

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ADRIANNE LÚCIA RIBEIRO MOREIRA

**PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À AÇÃO DE ÍONS
CLORETOS: MODELAGEM NUMÉRICA E APLICAÇÕES**

Vitória

2018

ADRIANNE LÚCIA RIBEIRO MOREIRA

**PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO SUBMETIDAS À AÇÃO DE PIONS CLORETOS:
MODELAGEM NUMÉRICA E APLICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Manoel Ferreira Frasson

VITÓRIA

2018

“Concern for man and his fate must always form the chief interest of all technical endeavors. Never forget this in the midst of your diagrams and equations.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Nesses dois anos de mestrado, eu quero agradecer inicialmente ao crescimento pessoal que me transformou em uma nova pessoa. A realização de que a vida é muito mais momentos e pessoas que trabalho bem feito, e que ela passa muito rápido. E pela grande oportunidade de ver meus colegas amadurecerem também. Agradeço a oportunidade de estudar um assunto que me apaixonei, o que me deu a motivação de continuar nessa pesquisa. Assim, várias pessoas foram essenciais para a conclusão dessa pesquisa. Agradeço aos meus pais e meus irmãos, pelo amor, apoio incondicional e incentivo diário tanto financeiramente quanto pessoalmente, sem eles nada seria possível.

Ao meu orientador Prof. Calmon, pela presença constante, por não desistir de seus alunos e sempre incentivar o melhor de nós e além de tudo ter acreditado no meu potencial. Ele foi essencial para todo meu aprendizado na área da pesquisa, agradeço por todo conhecimento compartilhado comigo. Ao meu co-orientador Prof. Frasson, por todas as manhãs e tardes tentando solucionar os problemas dessa programação. Pela paciência inimaginável com minha ansiedade que fez essa pesquisa se tornar possível, por me manter motivada nos piores momentos, provavelmente, sem saber.

Ao meu amigo e parceiro Wagner Dominicini, sem ele, essa pesquisa nem se iniciaria. Pela parceria perfeita, pelos dias, angústias, persistências, pelo respeito, pelo incentivo. A Ana Beatriz Suzano, por compartilhar seu modelo, seus ensinamentos, dúvidas e aflições. E assim, fecha os três mosqueteiros que tornaram possível o estudo dos modelos numéricos de corrosão em estruturas de concreto armado no PPGEC/UFES.

Aos amigos da turma de 2016, por todos os momentos compartilhados. Em especial agradeço ao Helio Gomes Filho, pelas dúvidas trocadas, conversas, risadas e, claro, toda sua sabedoria com a programação. Aos amigos do LabesBIM, Ana Beatriz Suzano, Thais Sartori, Marianne Cavalcante, Karine Bastos, Luan Alves pelos dias, pelas risadas e pelos cafés compartilhados. Por compartilharem esse momento tão solitário que acaba se tornando o meio da pesquisa acadêmica.

Agradeço aos professores do PPGECC, Jamila Teixeira, Rodrigo Carmargo, Rodrigo Rosa, Macksuel Azevedo, Elcio Alves e, em especial, a Geilma Vieira, pela atenção, pelos ensinamentos e conversas, por ser um exemplo de mulher na engenharia para todas nós, alunas. Ao carinho e à paciência do Sidney e da Ingrid durante todo esse processo.

Por fim, à CAPES, pelo apoio financeiro no final desse trabalho, que tornaram possível a finalização dessa pesquisa.

RESUMO

MOREIRA, A. L. R. **PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À AÇÃO DE ÍONS CLORETOS: MODELAGEM NUMÉRICA E APLICAÇÕES**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo.

A corrosão das armaduras das estruturas de concreto devido a penetração de íons cloreto é um dos maiores causadores de deterioração prematura das estruturas. A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto é diretamente afetada pela corrosão das armaduras. Além da importância para a segurança estrutural, a vida útil de estruturas de concreto armado apresenta um importante papel para o desenvolvimento sustentável. Do ponto de vista de projetos duráveis, o conhecimento dos mecanismos de deterioração e o desenvolvimento de uma ferramenta baseada na performance da estrutura são essenciais para garantir a segurança, a execução de estruturas duráveis e a identificação de medidas apropriadas para a manutenção da vida útil das estruturas, assim como uma abordagem racional para o reparo das estruturas danificadas.

Modelos de durabilidade mais sofisticados devem ser considerados para o design e para estimar a vida útil da estrutura, principalmente em ambientes agressivos, considerando o tipo de cimento e reduzindo o consumo de materiais através da otimização do cobrimento e escolha adequada dos materiais. Portanto, uma ferramenta numérica é desejável para a previsão da vida útil das estruturas de concreto, o que pode demonstrar mais realisticamente os processos de corrosão e suas consequências na performance do concreto. Assim, esse trabalho descreve um modelo numérico para prever a vida útil de estruturas de concreto.

O principal objetivo desse estudo é de desenvolver um modelo numérico e demonstrar o uso deste em algumas aplicações. A difusão de cloretos é implementada com o método dos elementos finitos em domínio bidimensional e sua formulação é apresentada. Temperatura e fluxo de umidade na localização da estrutura são consideradas no modelo de forma acoplada a difusão de íons cloreto. O modelo numérico é comparado a outros modelos numéricos e com as soluções analíticas da 2ª Lei de Fick por verificar sua confiabilidade. Além disso, o uso do modelo é demonstrado para a provisão de vida útil para diferentes concretos, demonstrando a importância da escolha do concreto para a vida útil da estrutura.

Por fim, essa dissertação esclarece o uso de modelos numéricos preditivos para a corrosão de armaduras de concreto, oferecendo uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão para o design de novas estruturas ou planejamento de manutenção de uma estrutura existente.

ABSTRACT

MOREIRA, A. L. R. SERVICE LIFE PREDICITON OF CONCRETE STRUCTURES SUBMITTED TO THE ACTION OF CHLORIDE ICONS: NUMERICAL MODELING AND APPLICATIONS. 2018. Dissertation. Civil Engineering Graduate Program, Federal Unvieristy of Espirito Santo.

Corrosion of concrete reinforcement due to penetration of chloride ions is one of the major causes of premature deterioration of structures. The durability and useful life of concrete structures are directly affected by the corrosion of the reinforcement. In addition to the importance of structural safety, the useful life of reinforced concrete structures plays an important role in sustainable development. From the point of view of durable projects, knowledge of deterioration mechanisms and the development of a tool based on the performance of the structure are essential to ensure safety, the execution of durable structures and the identification of appropriate measures to maintain the life of structures, as well as a rational approach to the repair of damaged structures.

More sophisticated durability models should be considered for design and to estimate the life of the structure, especially in aggressive environments, considering the type of cement and reducing material consumption through the optimum concrete cover and proper choice of materials. Therefore, a numerical tool is desirable for predicting the useful life of concrete structures, which can more realistically demonstrate corrosion processes and their consequences on concrete performance. Thus, this work describes a numerical model to predict the useful life of concrete structures.

The main objective of this study is to develop a numerical model and demonstrate its use in some applications. The diffusion of chlorides is implemented with the finite element method in the two-dimensional domain and its formulation is presented. Temperature and moisture flux at the location of the structure is considered in the model coupled with the diffusion of chloride ions. The numerical model is compared to other numerical models and Fick's 2nd Law analytical solutions to verify their reliability. In addition, the use of the model is demonstrated for the provision of useful life for different concrete, demonstrating the importance of choosing the concrete for the useful life of the structure.

Finally, this dissertation clarifies the use of predictive numerical models for the corrosion of concrete reinforcement, offering a tool to assist in decision making for the design of new structures or the planning of an existing structure.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	7
1.2	OBJETIVO GERAL	10
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	10
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	DURABILIDADE E CORROSÃO DA ARMADURA	13
2.2	CORROSÃO INDUZIDA POR ÍONS CLORETO	15
2.2.1	PROCESSOS DA DIFUSÃO E CONVECÇÃO	17
2.2.2	COEFICIENTE DE DIFUSÃO	20
2.2.3	CONCENTRAÇÃO CRÍTICA DE CLORETOS	21
2.2.4	CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO E CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS	23
2.2.5	COMBINAÇÃO DE CLORETOS	26
2.3	CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO	30
2.3.1	EFEITO DA CARBONATAÇÃO NA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO NO CONCRETO	33
2.4	MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL	34
2.4.1	MODELOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS	36
3	MODELO NÚMÉRICO – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E ESTRUTURA	53
3.1	MODELO PROPOSTO	53
3.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	54
3.2.1	DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS E INTEGRAÇÃO NUMÉRICA	54
3.2.2	EQUAÇÕES E MÉTODO DE GARLEKIN PARA A TRANSFERÊNCIA DE CALOR	58
3.2.3	MÉTODO DE GARLEKIN PARA O FLUXO DE UMIDADE	61
3.2.4	MÉTODO DE GARLEKIN PARA TRANSPORTE DE CLORETOS	65
3.3	ESTRUTURAÇÃO DO MODELO	70
3.3.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO	71
3.3.2	FLUXOGRAMA DO MODELO	73
4	APLICAÇÃO DO MODELO – SIMULAÇÕES E RESULTADOS	76

4.1	INTRODUÇÃO	76
4.2	RESULTADOS COM SOLUÇÕES ANALÍTICAS	76
4.3	SIMULAÇÕES COM OUTROS MODELOS NUMÉRICOS	80
4.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DIFUSÃO E CONVECÇÃO	86
4.5	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS	88
4.6	PREVISÃO DE VIDA ÚTIL E PROJETOS DURAVÉIS	94
4.7	PREVISÃO DE VIDA ÚTIL PARA ESTRUTURAS EXISTENTES	99
4.7.1	ESTRUTURA DO ESTUDO DE CAVALARO <i>ET AL.</i> (2015)	99
4.8	ANÁLISE DO PILAR LOCALIZADO NA 3ª PONTE DA CIDADE DE VITÓRIA	103
4.9	RESUMO DA UTILIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PARA PROJETOS DURAVÉIS	111
5	CONCLUSÕES	115
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	115
5.2	CONCLUSÕES QUANTO AO MODELO E SUA UTILIZAÇÃO	116
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	117
6	REFERÊNCIAS	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente de difusão para diferentes tipos de concreto.....	21
Tabela 2.2 – Valores de concentração crítica.....	22
Tabela 2.3 – Concentração crítica por tipo de de aço.....	23
Tabela 2.4 – Valores de concentração superficial para cada condição de exposição.....	24
Tabela 2.5 – Formulações para as principais isotermas de combinação de cloretos.....	27
Tabela 2.6 – Formulação da 2ª Lei de Fick entre modelos numéricos.....	41
Tabela 2.7 – Formulação do coeficiente de difusão de cloretos entre modelos numéricos	42
Tabela 2.8 – Diferenças no fluxo de umidade entre modelos numéricos.....	43
Tabela 2.9 – Diferenças no coeficiente de difusão de umidade entre modelos numéricos	44
Tabela 2.10 – Funções para o coeficiente de difusão de cloretos.....	46
Tabela 2.11– Funções para o coeficiente de difusão de umidade	48
Tabela 3.1 – Pesos para 7 pontos da quadratura numérica no triangulo elementar.....	56
Tabela 3.2 - Resumo das formulações utilizadas	69
Tabela 4.1 – Parâmetros para a simulação	79
Tabela 4.2 – Parâmetros para simulação do processo difusão-convecção simplificado	80
Tabela 4.3 – Parâmetros para a simulação entre modelos numéricos	83
Tabela 4.4 – Valores de concentração superficial utilizados.....	89
Tabela 4.5 – Tipos de combinação de cloretos considerados.....	90
Tabela 4.6 – Valores de concentração de cloretos para combinação de cloretos linear e sem combinação de cloretos	91
Tabela 4.7 – Parâmetros climáticos utilizados para as cidade de Vitória e Montreal	92
Tabela 4.8 – Características de cada tipo de concreto selecionado	95
Tabela 4.9 – Parâmetros de entrada para os tipos de concreto selecionado	95
Tabela 4.10 – Valores do cobrimento para uma vida útil de 50 para os concretos 2A e 3A....	98
Tabela 4.11 – Valores obtidos a partir dos valores obtidos da curva	102
Tabela 4.12 – Resumo dos parâmetros de entrada para o modelo numérico	107
Tabela 4.13 – Melhor ajuste do coeficiente de difusão e concentração superficial	109
Tabela 4.14 – Valores de concentração de cloretos para PN2-N e PN2-O	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo da corrosão das armaduras	13
Figura 2.2 – Corrosão das armaduras por íons cloreto	16
Figura 2.3 – Variação da concentração de cloretos para estruturas submetidas aos ciclos de molhagem e secagem.....	19
Figura 2.4 – Principais fatores destacados na literatura que contribuem para o processo de corrosão	20
Figura 2.5 – Ajuste de curvas das isotermas para concreto OPC com $a/c = 0.50$	28
Figura 2.6 – Efeito da combinação de cloretos no coeficiente de difusão.	29
Figura 2.7 – Perfis de cloretos totais para diferentes isotermas de combinação. a) Após 5 anos de exposição. b) Após 25 anos de exposição	30
Figura 2.8 – Frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.....	32
Figura 2.9 – Principais diferenças entre modelos numéricos	39
Figura 2.10 – Modelos numéricos selecionados.....	40
Figura 2.11 – Principais fatores e variáveis para o transporte de cloretos	51
Figura 3.1 – Elemento triangular curvo para coordenadas locais.....	55
Figura 3.2 – Localização dos 7 pontos para integração no plano $\xi \times \eta$	56
Figura 3.3 – Elemento triangular linear.....	57
Figura 3.4 – Representação do desenvolvimento do modelo	71
Figura 3.5 – Fluxograma para cálculo da temperatura, umidade e cloretos	74
Figura 4.1 – Geometria para simulação.....	77
Figura 4.2 – Malha utilizada para a simulação.....	78
Figura 4.3 – Resultados da solução analítica e resultados numéricos para difusão simples	79
Figura 4.4 – Comparação entre a solução analítica e resultados numéricos para a convecção simplificada após 1 ano	80
Figura 4.5 – Variação da temperatura e umidade ambiente	82
Figura 4.6 – Resultados de concentração de cloretos para 10 anos.....	84
Figura 4.7 – Resultados de concentração de cloretos para 30 anos.....	84
Figura 4.8 – Resultados de concentração de cloretos para 50 anos.....	85
Figura 4.9 – Comparação entre os resultados de difusão e resultados de convecção-difusão após 1 ano	87
Figura 4.10 – Comparação entre os resultados de difusão e resultados de convecção-difusão após 5 anos	87
Figura 4.11 – Variação da concentração de cloretos após 1 ano	89

Figura 4.12 – Variação da concentração de cloretos após 5 anos	89
Figura 4.13 – Comparação entre resultados da concentração de cloretos sem combinação de cloretos e combinação linear após 1 ano	90
Figura 4.14 – Comparação entre resultados da concentração de cloretos sem combinação de cloretos e combinação linear após 5 anos.....	91
Figura 4.15 – Comparação entre os resultados de concentração de cloretos obtidos para a cidade de Vitória e Montreal após 1 ano	93
Figura 4.16 – Comparação entre os resultados de concentração de cloretos obtidos para a cidade de Vitória e Montreal após 1 ano	93
Figura 4.17 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto após 10 anos	96
Figura 4.18 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto após 20 anos	96
Figura 4.19 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto após 30 anos	97
Figura 4.20 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto	98
Figura 4.21 – Seção transversal da viga de estudo	100
Figura 4.22 – Perfis de cloretos para cada amostra e curvas ajustadas a) 4DE b) 5SE c) 6SE d) 7DE e) 8DE f) Previsão de vida útil.	101
Figura 4.23 – Concentração de cloretos com o tempo no cobrimento da viga.....	103
Figura 4.24 – Fotografia da ponte de concreto investigada.....	104
Figura 4.25 – Localização do pilar PN2 da ponte	104
Figura 4.26 – Divisão do pilar do concreto selecionado para a simulação numérica.....	106
Figura 4.27 – Curvas ajustados nos perfis de cloretos da face norte do pilar (PN2-N)	108
Figura 4.28 – Curvas ajustados nos perfis de cloretos da face oeste do pilar (PN2-O)	108
Figura 4.29 – Variação da concentração de cloretos por ano para PN2-N e PN2-O.....	110
Figura 4.30 – Processo e parâmetros para a previsão de vida útil.....	112

LISTA DE SÍMBOLOS

w_i = função de ponderação do método

Ω	= representa o domínio do problema
Γ	= representa o contorno do problema
ρ_c	= densidade do concreto (kg/m ³)
c_c	= calor específico do concreto (J/kgK)
T	= temperatura no concreto na distância x e y (K)
λ	= condutividade do material (W/m.K)
B_T	= coeficiente de transferência de calor na superfície (W/(m ² °C))
T_{env}	= temperatura do ambiente no entorno (K)
T_{min}	= temperatura mínima anual (K)
T_{max}	= temperatura máxima anual (K)
$dia_{T_{max}}$	= dia em que ocorre a temperatura máxima
U_m	= energia de ativação do processo de difusão de humidade (kJ/mol)
R	= constante do gás (kJ/mol)
T_{ref}	= temperatura de referência que o coeficiente de difusão $D_{h,ref}$ foi avaliado
T	= temperatura do concreto (K)
t_e	= representa o período de hidratação (dias)
h	= umidade relativa dos poros do concreto
w_e	= quantidade de água evaporável (m ³ de água/m ³ de concreto)
h_{env}	= umidade do ambiente no entorno
h_{min}	= umidade mínima anual
h_{max}	= umidade máxima anual
$dia_{h_{max}}$	= dia em que ocorre a máxima umidade
B_h	= coeficiente de transferência de umidade na superfície (m ² /s)
h^s	= umidade relativa dos poros do concreto na superfície
C_{fc}	= concentração de cloretos livres (kg/m ³ de concreto)
C_{tc}	= concentração de cloretos totais (kg/m ³ de concreto)
$D_{c,ref}$	= coeficiente de difusão de referência (m ² /s)
D_c	= coeficiente de difusão efetivo de cloretos (m ² /s)
D_c^*	= coeficiente de difusão aparente de cloretos (m ² /s)
$D_{h,ref}$	= coeficiente de umidade de referência (m ² /s)
D_h	= coeficiente de difusão efetivo de umidade (m ² /s)

D_h^*	= coeficiente de difusão de humidade (m ² /s)
C_{bc}	= concentração de cloretos combinados (kg/m ³ de concreto)
Uc	= energia de ativação do processo de difusão de cloretos (kJ/mol)
T_{ref} (K)	= temperatura de referência onde o cloreto de difusão de referência foi calculado
t_{ref}	= tempo de exposição que o cloreto de difusão de referência foi medido
t	= atual tempo de exposição
m	= fator de redução da idade para a difusão de cloretos
h_c	= humidade que D_c decai metade entre os valores máximos e mínimos (0,75)
C_{env}	= concentração de cloretos no ambiente
C_{fc}^S	= concentração de cloretos livres na superfície no concreto
B_c	= coeficiente de transferência de cloretos na superfície (m ² /s)
h_{env}	= umidade relativa do ambiente
h^S	= umidade relativa dos na superfície do concreto
B_h	= coeficiente de transferência de umidade na superfície (m ² /s)
α	= inclinação da isoterma linear
$\frac{\partial w_e}{\partial h}$	= capacidade de umidade

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Justificativa

As estruturas de concreto dependendo do ambiente no qual estão expostas sofrem alterações que podem com o passar do tempo comprometer a sua estabilidade, segurança estrutural e a sua funcionalidade. Dependendo da agressividade do ambiente, a estrutura deve ser preparada de forma a suportar a condição de exposição que se encontra submetida. No entanto, parece que a importância da durabilidade tem sido subestimada por muitos anos no projeto e produção tradicional de estruturas de concreto (GJORV, 2015), o que ocasionou aumento em orçamentos em reparo e manutenção da infraestrutura de concreto existente.

São vários os processos de deterioração que podem afetar a durabilidade das estruturas de concreto armado e o desempenho das estruturas de concreto, como as reações álcali-agregado, gelo e degelo, ataques químicos, porém o que tem se tornado um dos processos mais preocupantes é a corrosão das armaduras (GJORV, 2015; ANDRADE et al., 2013; ANDRADE; MARTÍNEZ, 2009). Conforme RIBEIRO et al. (2015), a corrosão pode ser considerada como uma interação destrutiva de um material com o ambiente em que está inserido, ocasionado por reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, com participação ou não de ações físicas ou mecânicas de deterioração. Os principais processos desencadeadores da corrosão são a penetração de íons cloreto e a exposição a ambientes com dióxido de carbono, ocasionando o fenômeno da carbonatação (ANDRADE; MARTÍNEZ, 2009; FIGUEIREDO et al., 2013; TUUTTI, 1982).

Os danos associados a durabilidade das estruturas de concreto apresentam um gasto acentuado em relação ao reparo de estruturas que sofrerão com o processo da corrosão. A maioria das estruturas de concreto armado sofrem reparos e manutenção corretiva, ou seja, elas já encontram em um estágio avançado de degradação quando medidas adequadas são tomadas (GJORV, 2015). Nesse estágio, para a corrosão das armaduras, os reparos são mais difíceis e indiscutivelmente mais caros quando comparados à manutenção preventiva.

Um estudo desenvolvido nos Estados Unidos em 2002 relatou o custo anual de \$22,6 bilhões para reparo e manutenção de estruturas que sofreram com o processo de corrosão

(TECHNOLOGIES, 2002). No Brasil, segundo Dal Molin (1988), em levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul, ao se considerar as manifestações patológicas graves, com implicação na segurança estrutural, a incidência de corrosão das armaduras chega em 40% dos casos estudados. Assim, o crescimento dos custos envolvendo a reposição de estruturas, o fator relativo a segurança e confiabilidade estrutural e a crescente ênfase no custo de ciclo de vida são fatores que estão forçando os engenheiros a dedicar-se aos aspectos de durabilidade e extensão da vida útil (METHA e MONTEIRO, 2006).

Além dos problemas de deterioração crescente nas estruturas de concreto devido a corrosão e o ponto de vista econômico, a vida útil de estruturas de concreto afeta diretamente a sustentabilidade (GJORV, 2015), tema que vem sendo muito abordado nas últimas décadas. O estudo da durabilidade das construções ganha destaque nessa temática, já que a construção civil é uma área que é responsável por altas emissões de gás carbônico e alto consumo de matérias primas e energia. Diante da perspectiva de projetos duráveis, o conhecimento de técnicas que avaliam o comportamento do concreto e a sua vida útil frente aos ambientes agressivos é de vital importância para a durabilidade, que por sua vez é uma solução a longo prazo para o desenvolvimento sustentável (METHA e MONTEIRO, 2006).

Seguindo esse contexto, no mercado atual alguns fatores têm merecido destaque nos projetos, gerenciamento da manutenção de estruturas e operação de empreendimentos como: programação da manutenção, estimativa de custos ao longo da vida útil, técnicas que demandam uma atitude sustentável e a necessidade de construir edificações com maior vida útil (ANDRADE; DIEZ; ALONSO, 1997; PANG; LI, 2016; PRADELLE; THIÉRY; BAROGHEL-BOUNY, 2016; SHI et al., 2012; TANG et al., 2015). Assim, projetistas de estruturas de concreto, por razões destacadas anteriormente, começam a ter uma preocupação com a estrutura, não só em relação a suas características de resistência mecânica, mas também em relação a sua durabilidade (METHA e MONTEIRO, 2006). Como as características de resistência mecânica do concreto são definidas por meios de ensaios e testes de resistência, o mesmo procedimento deveria ser aplicado para projetos de durabilidade quanto a corrosão das armaduras (ANDRADE et al., 2013).

A prática comum dos códigos e normas atuais é definir os requerimentos de durabilidade baseados na composição do concreto (cimento, tipo de agregado, sistema aglomerante, relação água/cimento), tamanho do cobrimento de acordo com a agressividade local, entre outros (ANDRADE et al., 2013; PRADELLE; THIÉRY; BAROGHEL-BOUNY, 2017). No entanto, essa abordagem é insuficiente para ambientes muito agressivos ou para a projetos com vida útil

de mais de 50 anos (ANDRADE et al., 2013). Para uma adequada investigação da estrutura, é essencial uma forma de avaliar como os mecanismos de deterioração influenciam a durabilidade da estrutura no ambiente em que esta está inserida e durante sua vida útil.

Assim, com a intenção de desenvolver uma solução otimizada, sustentável, capaz de fornecer o conhecimento sobre o atual estado da estrutura e projetar uma futura investigação para uma manutenção racional, existe uma demanda para se considerar procedimentos com conceitos mais avançados do que os procedimentos encontrados nos atuais códigos de construção (ANDRADE et al., 2013; ANDRADE; MARTÍNEZ, 2009; PRADELLE; THIÉRY; BAROGHEL-BOUNY, 2017). Dessa maneira, existe um esforço mundial para o desenvolvimento de projetos duráveis e modelos preditivos confiáveis, contribuindo para garantir a vida útil de estruturas de concreto com o menor custo e um plano de manutenção eficiente (BAROGHEL-BOUNY; NGUYEN; DANGLA, 2009).

Assim, modelos numéricos cada vez mais sofisticados, que descrevem o fenômeno da corrosão, são desenvolvidos para a necessidade de projetar e construir estruturas cada vez mais duráveis. Modelos matemáticos fornecem dados para a tomada de decisão de engenheiros em projetos de estruturas de concreto no interesse de manter a durabilidade, tanto para projetos de novas estruturas como para a manutenção dos existentes. No entanto, a vida útil de estruturas de concreto no ambiente é bastante complexa por depender não só dos mecanismos de penetração de agentes agressivos, mas também das propriedades do concreto e correta modelagem do ambiente (ANDRADE et al., 2006; PRADELLE; THIÉRY; BAROGHEL-BOUNY, 2016; SHI et al., 2012; ZHANG; LOUNIS, 2006).

Apesar de uma quantidade considerável de modelos de previsão de vida útil terem sido desenvolvidos, a existência de um grande número de fatores que envolvem a corrosão, os fatores pertinentes a definição do material concreto, a dificuldade de obter parâmetros de entrada exatos e a falta de experiência nessas novas abordagens, adicionais pesquisas sobre o uso dos modelos de previsão de vida útil ainda são necessárias (ANDRADE et al., 2013; MELCHERS; LI; LAWANWISUT, 2008; OŽBOLT et al., 2010; SHI et al., 2012; TANG; UTGENANT; BOUBITSAS, 2015). Além disso, muitos modelos não esclarecem seus parâmetros de entrada e variáveis escolhidas na sua modelagem, o que dificulta o uso ou a compreensão desses modelos por parte dos usuários.

Assim, este trabalho apresenta um modelo numérico computacional de penetração de cloretos no concreto através dos mecanismos de difusão e convecção, acoplado com o fluxo de umidade

e transferência de calor. Por facilitar a compreensão do uso do modelo, uma metodologia para sua utilização é descrita. Para englobar mais seu potencial de uso para estruturas de concreto, o modelo foi desenvolvido no domínio bidimensional. O modelo numérico utiliza o método dos elementos finitos (MEF) no domínio bidimensional e prevê o tempo necessário para que a concentração crítica de cloretos seja atingida para determinado ambiente.

1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral desenvolver um modelo numérico computacional para previsão da penetração de cloretos em estruturas de concreto armado, visando determinar a vida útil da estrutura.

1.3 Objetivos Específicos

Com a finalidade de atender o objetivo geral da pesquisa descrito no item anterior, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Análise crítica dos principais modelos numéricos de previsão de vida útil encontrados na literatura
- Desenvolvimento de um modelo numérico computacional no domínio bidimensional utilizando o método dos elementos finitos (MEF), aperfeiçoando os modelos de Dominicini (2016) e Suzano (2017);
- Comparar os resultados obtidos do modelo de penetração de íons cloretos com a solução analítica da 2ª Lei de Fick.
- Verificar resultados em relação a outros modelos numéricos: modelo de Dominicini (2016) e modelo de Suzano (2017).
- Avaliar os resultados de concentração de cloretos considerando diferentes zonas de exposição
- Avaliar os resultados de concentração de cloretos considerando a combinação de cloretos
- Avaliar resultados da concentração de cloretos considerando diferentes cidades.
- Aplicar o modelo desenvolvido na análise de previsão de vida para diferentes coeficientes de difusão (diferentes tipos de concreto) e avaliar no contexto de projetos duráveis.
- Aplicar o modelo na previsão de vida útil para estruturas existentes.

1.4 Limitações do Estudo

Este trabalho não tem por objetivo o modelo que descreva perfeitamente o processo de penetração de íons cloreto na estrutura de concreto. Apenas o período de iniciação da corrosão definido por Tuutti

(1982) é contemplado neste trabalho. Dessa maneira, quando a concentração crítica de cloretos for atingida nas armaduras é definido o fim da vida útil.

Um modelo exato de previsão de vida útil não é objetivo dessa dissertação, visto que toda modelagem computacional tem seus próprios limites e não simula com exatidão a realidade, que depende da avaliação dos parâmetros de entrada. No entanto, o modelo ainda é uma forma lógica ou uma ferramenta matemática de detectar e avaliar o estado da durabilidade de uma estrutura quanto a corrosão das armaduras. O modelo serve como uma ferramenta para tomada de decisões de engenheiros quanto a concepção de projetos duráveis ou quanto a verificação da vida útil para estruturas existentes.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em 5 capítulos. O capítulo 1 é a introdução desse trabalho, incluindo o tema da pesquisa, sua relevância, objetivos e limitações do estudo. No capítulo 2 é apresentado os conceitos necessários para compreender o processo de corrosão nas estruturas de concreto armado em relação a utilização de modelos de previsão de vida útil. Uma introdução aos modelos numéricos é realizada nesse capítulo, que consiste numa análise crítica dos principais modelos numéricos encontrados na literatura. Apesar de existir uma revisão dos modelos numéricos em outras dissertações, essa dissertação traz um diferencial na abordagem e análise das principais variáveis e constantes considerados nos modelos numéricos para esclarecer as diferenças e uso dos modelos numéricos.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia da pesquisa e a formulação do método dos elementos finitos utilizado para modelo desenvolvido nessa dissertação. Identifica-se a estrutura do modelos, softwares e características deste modelo.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos para a avaliação do modelo numérico e uso deste em diferentes aplicações, a fim de demonstrar sua aplicabilidade. O uso do modelo é apresentado nesse capítulo para projetos duráveis ou estruturas existentes. No capítulo 5, as conclusões e recomendações para trabalhos futuros são descritas. Por fim, as referências são apresentadas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

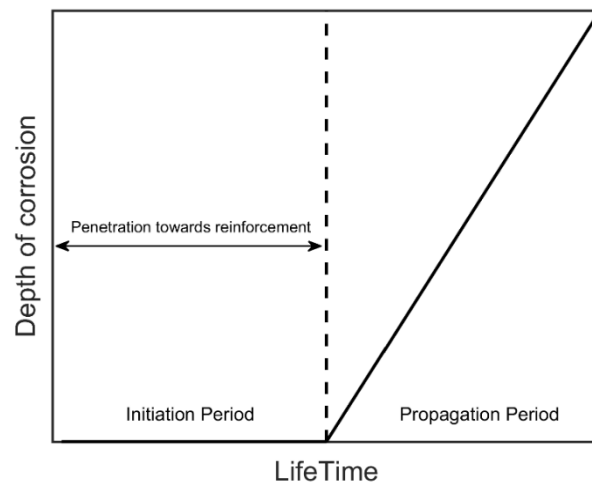
2.1 DURABILIDADE E CORROSÃO DA ARMADURA

Tradicionalmente, a maioria das estruturas de concreto são projetadas para uma vida útil de 50 anos, e grandes estruturas, como pontes, são projetadas para uma vida útil de 100 anos. No entanto, muitas estruturas em ambientes agressivos apresentaram sinais de deterioração do concreto durante sua vida útil (CAVALARO et al., 2015; COSTA; APPLETON, 2002), o que pode apresentar um problema para a durabilidade da estrutura. Os principais mecanismos de corrosão das armaduras são a penetração de cloretos no concreto e o fenômeno da carbonatação (ANDRADE; MARTÍNEZ, 2009; NGALA; PAGE, 1997; PAGE; SHORT; EL TARRAS, 1981)

O processo de corrosão é um processo eletroquímico que só terá início quando despassivada a armadura, ou seja, quando a fina camada de óxidos que envolve a armadura for rompida (RIBEIRO et al., 2014). O concreto armado oferece uma proteção física para a armadura dada pelo cobrimento de concreto, que dificulta a entrada de agentes agressivos externos. Outra proteção é conferida devido as reações de hidratação dos silicatos de cálcio, em especial o C_3S e o C_2S , do cimento que liberaram hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Esse componente dissolvido nos poros confere o caráter alcalino do concreto, que mantém o pH entre valores de 13 e 14 (TUUTTI, 1982). Em outras palavras, o cobrimento fornece uma barreira física para a entrada de agentes externos e uma proteção química conferida pela alta alcalinidade da solução dos poros. Além dos problemas econômicos e sustentáveis destacados na introdução deste trabalho, a performance estrutural é afetada pela corrosão das armaduras devido a redução da rigidez que resulta de dois efeitos combinados: a redução da seção da armadura e a perda da ligação entre concreto e aço (VIDAL, CASTEL, FRANCOIS, 2007).

Tuutti (1982) propôs que a deterioração das armaduras em estruturas de concreto devido a corrosão das armaduras pode ser dividida em duas principais etapas, associando a vida útil da estrutura (Figura 2.1). A primeira etapa, conhecida como período de iniciação, compreende o tempo até a despassivação da armadura. No caso da ação dos cloretos, ocorre a quebra da camada passivadora quando uma concentração crítica de íons cloretos acumula-se na região (RIBEIRO, et al., 2014). O tempo para chegar nessa quantidade crítica depende da taxa de penetração de íons cloretos, da profundidade do cobrimento e, principalmente, da concentração crítica de cloretos.

Figura 2.1 – Processo da corrosão das armaduras



Fonte: Adaptado de Tuutii (1982)

Em contrapartida, o processo de carbonatação reduz a alcalinidade da região do concreto e altera as condições de estabilidade química da película passivante da armadura, tornando possível o processo corrosivo (POSSAN, 2010). Dessa forma, o concreto estará susceptível ao processo chamado despassivação, através da redução do valor do pH nos poros do concreto pela carbonatação ou pela presença de uma quantidade crítica de cloretos ao redor da superfície da armadura (HELENE, 1993), caracterizando a perda da proteção na superfície da armadura que impede a corrosão. A partir desse momento, inicia o segundo processo de deterioração definida como propagação (Figura 2.1).

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado depende de conceitos multidisciplinares da química dos materiais e dos fenômenos físicos que ocorrem nas estruturas (Saetta, Schrefler, & Vitalini, 1993a). O principal mecanismo de transporte de cloretos e ingresso de gás carbônico no concreto é dado pela difusão, que é a entrada de agentes da superfície para a solução de poros do concreto (MARTÍN-PEREZ, 1999).

A durabilidade do concreto depende da sua capacidade de resistir aos agentes agressivos no ambiente em que está inserido e a capacidade de proteção da armadura no concreto. As principais razões para a performance insatisfatória do concreto são deficiências relativas a construção e a falta de conhecimento sobre os mecanismos de deterioração, resultando em uma planejamento insuficiente e erros na estimativa dos efeitos do ambiente (COSTA; APPLETON, 2002).

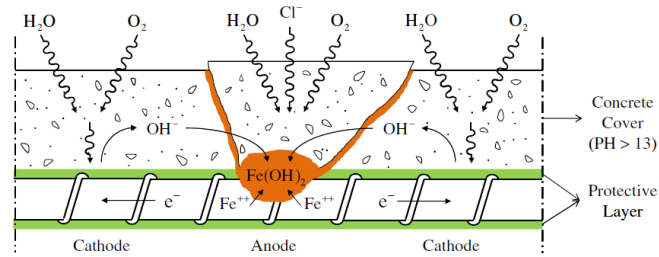
A partir do seu extenso estudo em estruturas da costa holandesa, Gjorv (2015) ressalta que quaisquer falhas e deficiências originadas na construção se revelarão rapidamente em ambientes de severa agressividade, independente das especificações de durabilidade e materiais aplicados. Além disso, segundo o autor, mesmo que os requisitos de durabilidade mais rigorosos tenham sido atingidos durante a concretagem, a experiência demonstra que sempre ocorrerá uma certa taxa de penetração de agentes agressivos durante a operação da estrutura.

Assim, um dos principais objetivos do estudo de durabilidade é evitar que ocorra problemas de deterioração no período da vida útil da estrutura. Segundo Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995), para estruturas já existentes, o objetivo é prever a evolução da deterioração no tempo mantendo em níveis seguros afim de planejar uma manutenção eficiente e futuras inspeções se necessárias. Já para novas estruturas, conforme os autores, o objetivo deve ser de avaliar o melhor tipo de concreto para determinado ambiente, com características suficientes para garantir a vida útil da estrutura e sua durabilidade no tempo.

2.2 CORROSÃO INDUZIDA POR ÍONS CLORETO

A corrosão provocada pela ação dos íons cloreto é um dos assuntos mais preocupantes quanto a durabilidade do concreto. A corrosão é um processo eletroquímico caracterizado pelo fluxo de elétrons e íons e formando uma região catódica e região anódica. Esse tipo de reação requer um condutor metálico conectando o anodo e cátodo (armadura de aço), um eletrólito para a movimentação dos íons (solução nos poros do concreto), uma diferença de potencial e a presença de gás oxigênio. A Figura 2.2 evidencia os principais componentes eletroquímicos para a corrosão das armaduras.

Figura 2.2 – Corrosão das armaduras por íons cloreto



Fonte: Cao (2014), p. 436

Dessa forma, o processo de corrosão é iniciado com o estabelecimento de uma diferença de potencial que pode ser causada pela diferença na concentração de íons presentes na solução de poros no concreto e ao longo da superfície da armadura. Simplificadamente, pode-se explicar o processo de corrosão pelas reações que ocorrem entre o catodo e o anodo. Como descrito em Martín-Perez (1999) e Ribeiro et al. (2014), o ferro é oxidado no anodo e perde elétrons na reação como demonstrado na equação 2.1.



Os elétrons liberados movem-se pela barra de aço até o catodo. Com quantidade suficiente de umidade e oxigênio, os elétrons provocam a redução do oxigênio dissolvido nos poros (equação 2.2). Depois dessa reação, ocorre a liberação de íons hidroxila que se movem para o anodo, onde se combinam com os íons de ferro dissolvidos na região para formar hidróxido de ferro (equação 3).



O hidróxido de ferro pode ser oxidado em outros produtos de corrosão caso haja quantidade suficiente de oxigênio.

O processo de corrosão local reduz a seção de aço presente no elemento, causando redução da capacidade de suportar tensões de tração. Com muita frequência, a manifestação da corrosão é dada pela manifestação em forma de fissuras ou destacamento do cobrimento do concreto. Isso é explicado pelo aumento expressivo de volume dos produtos da corrosão, que gera tensões de tração maiores que a resistência de tração do material (RIBEIRO et al., 2014).

Assim, o próprio processo da corrosão pode contribuir para a continuação das reações, seja por destacamento do cobrimento ou pela formação de fissuras neste. O mais difícil é a distinção do

grau do processo de corrosão, o que pode não se tornar claro sem um estudo detalhado da estrutura em corrosão. Com o retardamento do uso de processos de manutenção ou correção preventiva por falta de acompanhamento da estrutura, o custo para tais processos se torna excessivo.

2.2.1 Processos da difusão e convecção

Como destacado na seção anterior, o processo da corrosão por íons cloreto necessita da entrada desse íon, presença de oxigênio e de fatores eletroquímicos para que se desenvolva a reação. De uma maneira geral, pode-se dizer que o problema da corrosão por cloretos inicia-se usualmente quando íons cloreto no ambiente externo entram nos poros do concreto.

Os íons cloreto podem ser provenientes do contato com água do mar, da contaminação através da névoa salina, do emprego de aceleradores de pega que contém cloreto de cálcio ou do contato com os sais de degelo, utilizados no inverno (FIGUEIREDO et al., 2013; MELCHERS; LI, 2009; NEVILLE, 1995). Independente da forma como os cloretos se encontram no ambiente externo, a penetração de cloretos ocorre, principalmente, pelo fluxo de água contendo cloretos, sendo por difusão dos íons, absorção capilar de água contendo íons quando o concreto não está saturado, permeabilidade ou por migração iônica (NEVILLE, 1995; Ribeiro et al., 2014).

O transporte de difusão se caracteriza pelo fluxo de agentes do meio exterior para o interior. A existência de um gradiente de concentração de cloretos entre a superfície externa e a solução dos poros da matriz cimentícia contribui para a entrada dos agentes externos pela difusão iônica. Esse processo pode considerado o mecanismo mais comum de transporte de íons cloreto (GJORV, 2015). A partir disso, o estudo por representar por métodos matemático, o processo da corrosão em estruturas de concreto começou com a simulação do fenômeno da difusão.

O artigo de Collepardi et al. (1972) é provavelmente o primeiro documento onde os autores utilizam uma expressão matemática para quantificar a penetração de íons cloreto (MARCHAND; SAMSON, 2009). No seu trabalho, Collepardi (1972) utiliza a 2ª lei de Fick para descrever o fenômeno da difusão (Equação 2.4).

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

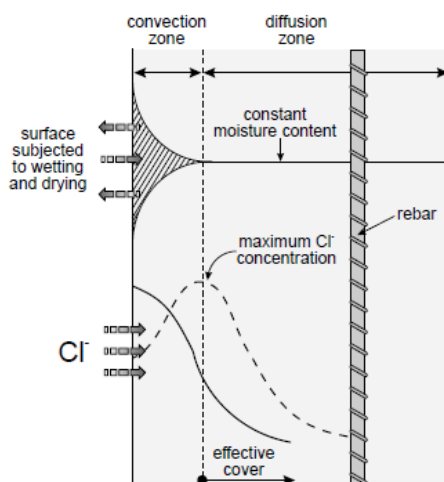
Onde C é a concentração de cloretos (kg/m^3) na profundidade x (m), no tempo t (s) e D_c é o coeficiente de difusão de cloretos (m^2/s).

A partir do estudo de Collepardi et al. (1972), muitos trabalhos seguem o uso da 2ª lei de Fick para avaliar o transporte de cloretos no concreto, sendo a partir de soluções analíticas ou soluções numéricas. No entanto, os perfis de concentração de cloretos em certas amostras mostraram curvas que não tem a forma suave prevista por essa lei (Marchand 2009). Essas curvas apresentam um máximo alguns centímetros dentro da superfície do concreto, podendo ser atribuídas ao fenômeno de absorção, efeitos da chuva ou a existência do efeito pele (zona mais próxima à superfície do cobrimento que possui composição diferente daquela das camadas mais internas) (ANDRADE; DIEZ; ALONSO, 1997; MARCHAND; SAMSON, 2009; SAETTA; SCOTTA; VITALIANI, 1993).

Nesse contexto, em alguns casos, prever a penetração de cloretos apenas através do mecanismo de difusão pode ser demasiadamente simplificado, contribuindo para uma previsão insatisfatória (MARCHAND; SAMSON, 2009; TANG et al., 2015). Isso é importante, principalmente, para as estruturas submetidas a ciclos de molhagem e secagem ou parcialmente saturadas, como é o caso de estruturas marinhas localizadas em zona de variação de maré (*tidal zone*) ou zonas de respingo de maré (*splash zone*) e estruturas expostas a saís de degelo. O que acontece é que os modelos de difusão subestima a concentração de cloretos (MARTÍN-PÉREZ, 1999; RASMUSSEN; HANSEN; LAZAROVA-MOLNAR, 2017; TANG et al., 2015) na maioria desses casos. O estudo de Costa e Appleton (2002), verificou que para as estruturas de concreto analisadas na costa marinha portuguesa, o processo de absorção capilar foi o mecanismo mais atuante, como resultado dos longos ciclos de molhagem e secagem nas paredes da estrutura. Isso ocorre devido ao mecanismo de difusão ser um processo muito mais lento que o movimento convectivo de íons cloreto dado pelo fluxo de umidade no concreto, como observado pelo autor.

Quando uma superfície de concreto parcialmente saturada está molhada, a água é rapidamente absorvida por sucção capilar, o que conjuntamente transporta íons cloreto dissolvidos para dentro do concreto (TUUTTI, 1982). A partir disso, uma zona do concreto mais próxima à superfície estará sujeita ao fenômeno da convecção, esta alcança uma profundidade de, geralmente, 10 a 20mm, dependendo das características do material e das condições expostas (ANDRADE; DIEZ; ALONSO, 1997; MARTÍN-PÉREZ, 1999). A Figura 2.3 demonstra a diferença entre a zona de difusão e zona convectiva, e a concentração máxima obtida a milímetros após a superfície do concreto.

Figura 2.3 – Variação da concentração de cloretos para estruturas submetidas aos ciclos de molhagem e secagem



Fonte: Martín-Pérez (1999, p. 27)

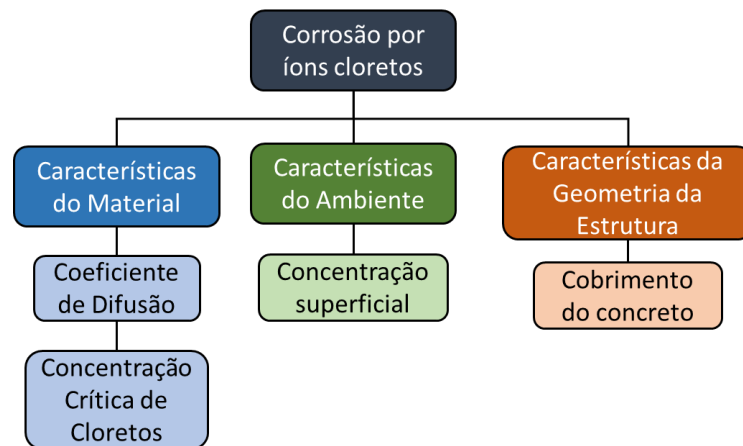
Assim, para uma análise mais confiável quanto a penetração de cloretos em estruturas de concreto, o mecanismo da absorção capilar deve ser considerado. Os modelos que consideram o ingresso de cloretos para concretos parcialmente saturados, precisam incluir a dependência do coeficiente de difusão de cloretos com o teor de umidade ou com a variação da umidade ambiente (GUIMARÃES et al., 2011), de forma a considerar a entrada de cloretos por difusão e por absorção capilar.

É importante destacar que vários fatores influenciam no transporte de cloretos como a proporção dos componentes de concreto (tipo de cimento, adições, relação água-cimento), a capacidade de combinação de cloretos, a cura do concreto, a proximidade com o mar, o teor de vazios no concreto, as características do ambiente de umidade e temperatura e a taxa de corrosão (BODDY et al., 1999; MEIRA et al., 2010; SONG; LEE; ANN, 2008).

Os principais fatores destacados no estudo de sensibilidade realizado por Pradelle, Thiery e Baroguel-Bouny (2017) e Zhang e Louis (2006), em respeito aos modelos de previsão envolvendo o tempo de iniciação da corrosão são: o coeficiente de difusão de cloretos, a concentração superficial de cloretos no concreto, o cobrimento das armaduras e a concentração crítica de cloreto. Assim, considerando os estudos de sensibilidade realizado pelos autores, pode-se dividir os fatores principais que influenciam o processo de corrosão por íons cloreto em 3 categorias: 1) tipo de material, 2) ambiente em que a estrutura está inserida e 3) geometria da estrutura.

A Figura 2.4 resume esses fatores. É importante destacar que a Figura 2.4 não retrata todos os fatores que podem influenciar a corrosão por íons cloreto, apenas resume os fatores destacados por diversos autores da literatura. Esses fatores serão brevemente descritos nas seções seguintes.

Figura 2.4 – Principais fatores destacados na literatura que contribuem para o processo de corrosão



Fonte: Autora

2.2.2 Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão, definido na equação 2.4, geralmente reflete a resistência do concreto para ao transporte de cloretos. Esse parâmetro depende do tipo de cimento e materiais cimentícios suplementares do concreto que influenciam o ingresso de umidade e íons no concreto (ANDRADE; CASTELLOTE; D'ANDREA, 2011; COSTA; APPLETON, 1999; SAETTA; SCOTTA; VITALIANI, 1993). Assim, a seleção do concreto que reduz o coeficiente de difusão aumenta a resistência do concreto no transporte desse agente, o que enfatiza a importância da escolha a apropriada do tipo de cimento e adições suplementares.

Normalmente, concretos com adições minerais, especialmente, cinza volante e escória de alto forno, apresentam coeficiente de difusão menores do que concretos com cimento Portland puro (LUPING; GULIKERS, 2007; THOMAS et al., 2012; THOMAS; BAMFORTH, 1999). Além disso, concretos com relação água-cimento maior, possuem coeficientes de difusão maiores (SONG; LEE; ANN, 2008). A Tabela 2.1 traz uma lista dos coeficientes de difusão dependendo do tipo de concreto encontrados na literatura.

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente de difusão para diferentes tipos de concreto

Concreto	Coeficiente de difusão ($10E-12 \text{ m}^2/\text{s}$)	
	90 dias	365 dias
0,30% a/cm - 4% SF	3,75	1,58
0,30 a/cm - 4% SF, 25% Slag	-	1,16
0,30 a/cm - 8% SF, 25% Slag	-	1,06
0,30 a/cm - 4% SF 25% Slag	3,02	1,29
0,40 a/cm - 100% OPC	10,30	5,61
0,40 a/cm - 8% SF	3,30	1,33
0,40 a/cm - 8% UFFA	3,77	1,59
0,35 a/cm - 12% UFFA	2,73	1,00
0,40 a/cm - 12% UFFA	2,79	1,22
0,31 a/cm - 12% UFFA	2,02	1,26
0,40 a/cm - 12% SF	1,88	1,09
0,33 a/cm - 16% UFFA	2,20	1,39

Nota: SF: sílica fume, Slag: escória, OPC: Cimento Portland
UFFA: Cinzas volantes ultra finas

Fonte: Adaptado de Noken *et al.* (2006)

Apesar da tabela 2.1 mostrar o coeficiente de difusão por tipo de concreto, o valor dessa propriedade pode variar dependendo de outros fatores como a cura do concreto, método de construção, adensamento do concreto e outros (GJORV, 2015). Além da influência das propriedades do concreto, é de comum conhecimento que o coeficiente de difusão é variante no tempo (ANDRADE; CASTELLOTE; D'ANDREA, 2011; COSTA; APPLETON, 1999; SAETTA; SCOTTA; VITALIANI, 1993). A umidade e temperatura são fatores que interferem ainda no coeficiente de difusão (BODDY et al., 1999; GUIMARÃES et al., 2011; LI; LI; CHEN, 2009; SAETTA; SCOTTA; VITALIANI, 1993). Assim, modelos preditivos normalmente consideram essas variações a partir de funções que descrevem a dependência da difusividade com os outros parâmetros. Essa questão é abordada na seção 2.4.

2.2.3 Concentração crítica de cloretos

A concentração de íons cloreto necessária para a despassivação da armadura é definida como a concentração crítica de cloretos. Esses valores dependem do tipo de aço, características eletroquímicas do ambiente do concreto, uso de adições minerais, teor de umidade e do método de detecção da despassivação (ALONSO et al., 2000; SONG; KWON, 2007; ZHANG; LOUNIS, 2006). O valor preciso para essa concentração ainda não foi aceito pelos pesquisadores, existindo uma discrepância de valores na literatura. No entanto, esse parâmetro

é fundamental, já que define o início da etapa de propagação do processo definido por Tuutti (1982).

Normalmente, os valores de concentração de cloretos livres são indicados a partir da concentração de cloretos livres e total por massa de cimento. Os autores Alonso et al. (2000) (2000) encontraram valores de $1,24 \pm 3,08\%$ e $0,39 \pm 1,16\%$, em relação a massa de cimento, para conteúdo total de cloretos e cloretos livres. Já os autores Glass e Buenfeld (1997), a partir de análise na literatura, reportam valores de 0,17 a 2,5% para quantidade total de cloretos em relação à massa de cimento.

Entretanto, não são numerosos os estudos em campo, sendo estes geralmente realizados em laboratório. Geralmente, esses estudos resultam valores críticos maiores do que os que seriam obtidos em experimentos nas condições de exposição de campo. Por exemplo, Meira et al. (2014) encontraram que a concentração limite em relação ao total de cloretos varia entre 1,82 e 2,45 (% da massa de cimento) e entre 0,88 e 1,58 (% da massa de cimento) para experimentos em laboratório e em campo, respectivamente.

Contudo, os autores afirmam que essa diferença entre resultados de laboratório e campo podem ser representadas por uma correlação linear e, assim, seria possível extrapolar resultados de experimentos em laboratório, que requerem menor tempo, para condições de exposição de campo. A Tabela 2.2 descreve alguns valores de concentração crítica. Além da influência do próprio concreto, diferentes tipos de aço possuem diferentes concentrações crítica de cloretos, mesmo para um tipo de aço existem uma variedade grande de valores (ZHANG; LOUNIS, 2006) (Tabela 2.3). Outros valores foram resumidos por Figueiredo e Meira (2013).

Tabela 2.2 – Valores de concentração crítica

Concentração Crítica de Cloretos		
Concreto Armado	Concreto Protendido	Referência
(% massa de cimento)	(% massa de cimento)	

0,40% (classe de agressividade I)	0,05%	NBR 12655
0,30% (classe de agressividade II)	0,05%	NBR 12656
0,15% (classe de agressividade III e IV)	0,05%	NBR 12657
0,60%	0,30%	Norma Espanha (Cavalero et al. 2015)
0,40%	0,20%	CEB-FIP (Europa)

Fonte: Autora

Tabela 2.3 – Concentração crítica por tipo de de aço

Tipo de aço	Concentração Crítica de Cloreto (kg/m ³)
Aço carbono convencional	0,30 - 0,71
Aço micro-composite MMFX	3,80 - 5,30
Aço Inoxidável SS304	4,10 - 6,00
Aço Inoxidável SS216LN	9,50 - 12,00

Fonte: Adaptado de Zhang e Lounis (2006)

Diante da grande variabilidade de resultados, a tendência é que sejam adotados valores conservadores com o objetivo de atender à maioria dos casos. Nesse sentido, para estruturas em concreto armado, Durar (1997) *apud* Figueiredo e Meira (2013) apresenta um limite de 0,4% de cloretos totais, em relação à massa de cimento, e EHE (2008) orienta, para condições normais, a adoção de um valor de 0,6% de cloretos totais em relação à massa de cimento. Vários autores na literatura consideram o valor de 0,4% de cloretos totais para análise do processo de corrosão em estruturas de concreto (BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011; CAVALARO et al., 2015). Entretanto, vale ressaltar que a concentração crítica de cloretos deverá ser estabelecida de acordo com as características particulares de cada estrutura.

2.2.4 Condições de exposição e concentração superficial de cloretos

O ambiente na qual a estrutura de concreto está localizada define a agressividade do local e a susceptibilidade da estrutura ao contato com íons cloreto. Nesse contexto, a concentração superficial de íons cloreto no concreto indica a condição de exposição da estrutura. Estruturas submetidas a altas concentrações superficiais indicam ambientes de alta agressividade, o que demanda uma análise mais cautelosa quanto ao ingresso de cloretos no concreto, o que pode ser feito por uma seleção de um coeficiente de difusão menor, por exemplo. Para estruturas em

ambientes marinhos, Weyers et al. (1993, apud ZHANG e LOUNIS, 2006) classificam em 4 categorias o ambiente em função da concentração superficial: leve, moderada, alta e severa exposição. A Tabela 2.4 mostra a variação da concentração superficial para cada tipo de exposição.

Tabela 2.4 – Valores de concentração superficial para cada condição de exposição

Concentração Superficial (kg/m³)	Condição de Exposição (tipo)
0 - 2,4	Baixa
2,4 - 4,7	Moderada
4,7 - 5,9	Alta
5,9 - 8,9	Severa

Fonte: (WEYERs et al., 1993, apud ZHANG e LOUNIS, 2006)

Além disso, o ambiente na qual o concreto está localizado influencia na concentração superficial, o que torna importante a definição das zonas de exposição. Normalmente, as zonas de exposição são divididas em 4 tipos (ANDRADE, 2001).

1. Zona de Atmosfera marinha (névoa salina): O concreto é atingido pela névoa salina que vem do oceano. Aqui o concreto não está em contato direto com a água. Normalmente, a quantidade de cloretos que atinge a estrutura vai diminuindo com a distância do mar, no entanto, dependendo do tipo da costa e direção dos ventos, a névoa salina pode penetrar quilômetros do litoral.
2. Zona de respingo de marés: O concreto está em contato com o mar através da molhagem do concreto pelas ondas. Localiza-se acima do nível do mar.
3. Zona de variação das marés: O concreto está submetido à ação dos ciclos de molhagem e secagem, onde há uma combinação dos mecanismos de absorção e difusão de íons no concreto.
4. Zona submersa: O concreto está em contato constante da água. O processo de difusão de cloretos é o único mecanismo de transporte atuante. Seu risco de corrosão é pequeno, já que o processo precisa da concentração de oxigênio.

O valor da concentração superficial é de extrema importância para a previsão de concentração de cloretos no concreto. Costa e Appleton (1999) e Song, Lee e Ann (2008) salientam que esse fator é variável no tempo e utilizar a concentração constante pode causar grandes erros para previsões a longo prazo. Isso é evidenciado no trabalho de Andrade et al. (2006), aonde os autores compararam oito modelos de difusão, cinco numéricos e três analíticos com a concentração superficial variando ou não. Os resultados demonstram que a concentração superficial assume um papel muito mais significativo do que o coeficiente de difusão, fato que foi evidenciado também no estudo de Zhang e Lounis (2006). Dessa forma, Andrade et al. (2006) ressalta a importância de se considerar uma lei de evolução da concentração superficial que descreve de maneira confiável esse parâmetro.

O estudo de Ann, Ahn e Ryou (2009) evidencia a importância da concentração superficial de cloretos em zonas de variação de maré ou respingo de maré e como essa concentração é acumulada nessas zonas. Os autores perceberam que a concentração superficial nas primeiras idades era muito alta ao se considerar a concentração sem variação no tempo para essas zonas, o que conduz a altas concentrações de cloretos no tempo no concreto. Assim, a concentração superficial para estruturas de concreto varia seguindo a ordem: zona de variação de marés > zona de respingos > zona atmosférica (COSTA; APPLETON, 1999; SONG; LEE; ANN, 2008).

Além disso condições ambientais como as condições climáticas podem afetar significativamente o ingresso de cloretos. Segundo Song, Lee e Ann (2008), estruturas de concreto em ambientes marinhos perto do Equador produzem uma alta concentração de concentração superficial se comparadas com estruturas em altas latitudes. O autor sugere que esse fato ocorre em regiões tropicais devido ao alto transporte iônico e altas concentrações de cloretos. É importante destacar que a distância em relação ao mar ainda influencia a concentração superficial (MEIRA et al., 2008) e altas velocidades do vento podem contribuir para altas concentrações superficiais (MEIRA et al., 2007).

De maneira geral, existem vários fatores que podem influenciar a concentração superficial e isso deve ser analisado cuidadosamente para cada ambiente em qual a estrutura está localizada. A vida útil da estrutura pode ser superestimada ou subestimada se não ocorrer uma análise detalhada das propriedades do material e as características ambientais da situação a ser modelada (BODDY et al., 1999) .

2.2.5 Combinação de cloretos

A principal forma de combinação de cloretos no concreto é a reação do aluminato de cálcio (C_3A) do cimento Portland formando o hidrato de cloro aluminato de cálcio ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), comumente conhecido como sal de Friedel (Neville, 1995). Cimentos que contém uma grande quantidade de C_3A podem combinar uma grande quantidade de cloretos. No entanto, a quantidade de cloretos combinados não é constante. Alguns cloretos combinados estão irreversivelmente combinados por reações químicas da hidratação, e outros podem ser “descombinados” a medida que a concentração de cloretos livres diminui (LUPING; NILSSON, 1993; THOMAS et al., 2012).

Assim, segundo (NEVILLE, 1995), os íons cloreto podem estar presentes nas seguintes formas: (1) cloretos livres, dissolvidos na solução dos poros, (2) combinados quimicamente com os produtos de hidratação do cimento, ou (3) cloretos fisicamente absorvidos na superfície dos poros em gel. No processo da corrosão, apenas os cloretos dissolvidos na solução dos poros, os cloretos livres, que são responsáveis por iniciar a corrosão (TUUTTI, 1982), somente nesse estado seria possível seu transporte pelo cobrimento do concreto (BAROGHEL-BOUNY et al., 2012; MARTÍN-PÉREZ et al., 2000). Assim, a habilidade dos hidratos do cimento de formar os cloretos combinados tem um importante efeito na concentração iônica dos cloretos, por consequência, tem um significativo papel no tempo de iniciação da corrosão (MARTÍN-PÉREZ et al., 2000; SANDBERG, 1999)

De acordo com Baroghel-Bouny et al. (2012), umas das principais consequências do efeito da combinação de cloretos no concreto é a redução na taxa do transporte de íons no concreto, já que a quantidade de íons livres é reduzida pelos mecanismos de combinação, reduzindo a quantidade dos cloretos livres susceptíveis de iniciar a corrosão. Assim, a capacidade dos produtos da hidratação de combinar-se com íons cloreto pode remover estes da solução dos poros, desacelerando a taxa de penetração de íons. Dessa forma, a combinação de cloretos no concreto afeta a taxa de difusão de cloretos, o que, por consequência, determina o tempo para a iniciação da corrosão.

Diante das pesquisas já desenvolvidas sobre a capacidade de combinação, segundo os autores Thomas et al. (2012) e Baroghel-Bouny (2012), é evidente que o uso de materiais cimentícios suplementares influencia consideravelmente a resistência do concreto quanto a corrosão por íons cloretos. Ainda de acordo com os autores, o efeito desses materiais é variado, mas de

maneira geral concretos com cinzas volantes e escória de alto forno aumentam a capacidade de combinação de cloretos, enquanto a sílica ativa diminui.

Outros fatores também influenciam na capacidade de combinação juntamente com a adição mineral do concreto. Por exemplo, uma redução da relação água-cimento de 0.50 para 0.30 tende a reduzir significativamente a capacidade de combinação com cinzas volantes e escória (THOMAS et al., 2012). Um aumento de C-S-H geralmente aumenta a capacidade de combinação, entretanto essa propriedade é normalmente reduzida com adição de sílica fume apesar do aumento com C-S-H (THOMAS et al., 2012). Assim, selecionando a composição adequada do concreto com materiais cimentícios suplementares afim de aprimorar a capacidade de combinação de cloretos é uma forma de aumentar a resistência do concreto quanto a penetração de íons cloretos.

Dessa forma, é de interesse adicionar a capacidade de combinação de cloretos na modelagem de penetração de cloretos, no entanto, isso requer o conhecimento das isotermas de combinação para diferentes tipo de sistema cimentício (SANDBERG, 1999; THOMAS et al., 2012). A propriedade de combinação dos cloretos depende das propriedades do sistema cimentício e são usualmente definidas por isotermas de combinação (do inglês: *binding isotherms*), que define a quantidade de cloretos combinados em função dos cloretos livres para uma determinada temperatura. Estas isotermas são únicas para cada sistema cimentício, uma vez que são influenciadas principalmente pelos componentes do cimento (por exemplo, teor de C_3A), materiais cimentícios suplementares, composição química da solução nos poros, quantidade de hidratos de silicato de cálcio C-S-H e pH da solução nos poros (BAROGHEL-BOUNY et al., 2012; CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 1999; THOMAS et al., 2012).

Formulações analíticas que representam o processo de combinação é obtido e pode ser implementado em modelos numéricos (BAROGHEL-BOUNY et al., 2012). As principais aproximações utilizadas são: isoterma linear, isoterma de Langmuir e isoterma de Freundlich. A Tabela 2.5 demonstra as formulações para cada isoterma, sabendo que os valores de α e β dependem do sistema cimentício

Tabela 2.5 – Formulações para as principais isotermas de combinação de cloretos

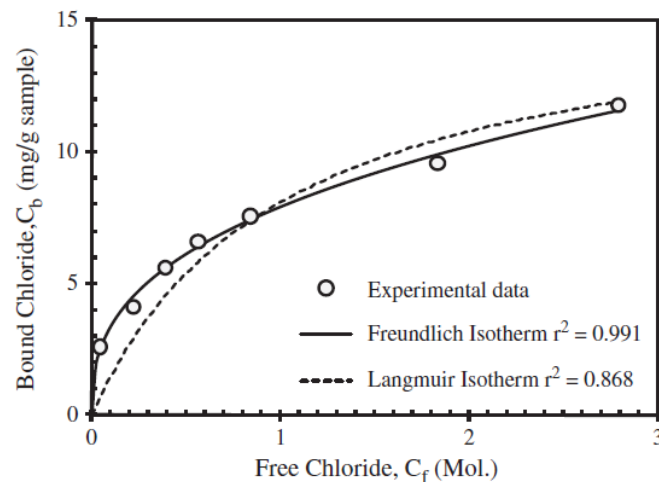
Isotérmica	C_{bc}	Fatores
------------	----------	---------

Sem combinação	$C_{bc} = 0$	- C_{bc} : concentração de cloretos combinados
Linear	$C_{bc} = \alpha C_{fc}$	- α : fator que depende do sistema cimentício - C_{fc} : concentração de cloretos livres
Langmuir	$C_{bc} = \frac{\alpha C_{fc}}{1 + \beta C_{fc}}$	- α, β : fatores que dependem do sistema cimentício - C_{fc} : concentração de cloretos livres
Freundlich	$C_{bc} = \alpha C_{fc}^\beta$	- α, β : fatores que dependem do sistema cimentício - C_{fc} : concentração de cloretos livres

Fonte: Adaptado de Martin-Perez (1999)

Na literatura essas isotermas são comparadas com ensaios considerando diferentes tipos de concretos afim de verificar com qual isoterma as amostras se adequam melhor. Thomas et al. (2012) realizaram um extenso estudo com diferentes composições de concreto, afim de verificar o comportamento das amostras de concreto com a isoterma de Freundlich e Langmuir. A Figura 2.5 demonstra o resultado do ajuste de curva das isotermas para o concreto com cimento Portland (OPC – *Ordinary Portland Cement*) e relação água-cimento de 0,50. Para os resultados obtidos pelos autores, a isoterma de Freundlich apresentou um ajuste de curva melhor que a isoterma de Langmuir.

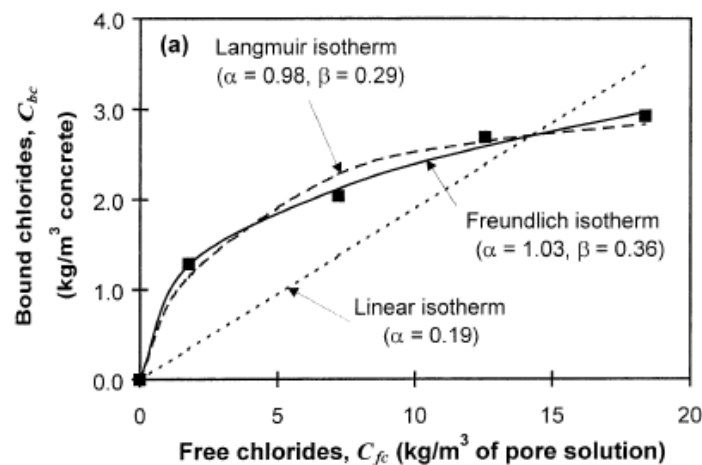
Figura 2.5 – Ajuste de curvas das isotermas para concreto OPC com a/c = 0.50



Fonte: Thomas et al. (2012), p. 3

A pesquisa de Martín-Perez (1999) compara o uso das isothermas de combinação com resultados de amostras de concreto com relação água-cimento de 0,30 e 40% de cinza volante, imersas em uma solução de cloretos de 0.5 M (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Efeito da combinação de cloretos no coeficiente de difusão.



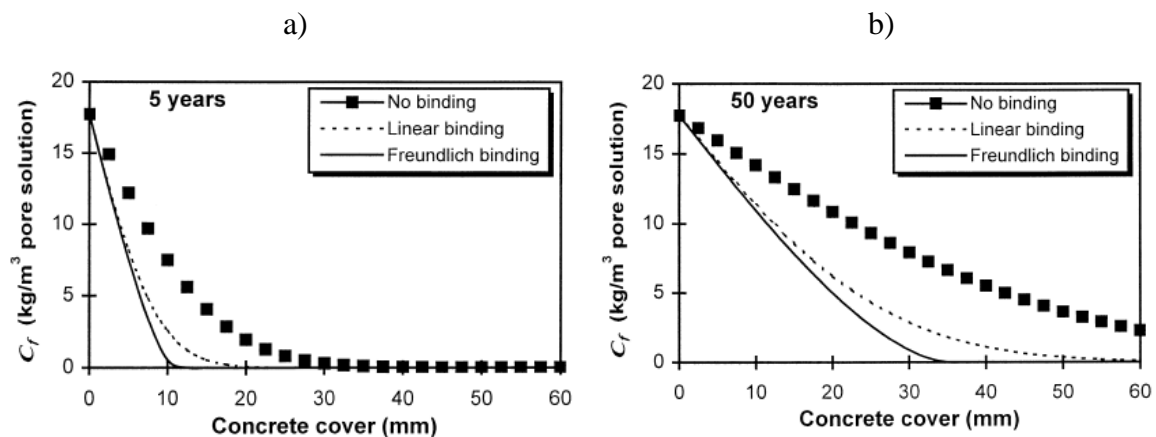
Fonte: Martín-Perez et al. (2000), p. 1218

A partir da Figura 2.6, é possível destacar que a isoterma linear não representa bem o comportamento dos cloretos combinados com cloretos livres. Fato destacado por outros autores (BAROGHEL-BOUNY et al., 2012; LUPING; NILSSON, 1993; THOMAS et al., 2012). Para os resultados obtidos de Luping e Nilsson (1993) a curva de Freundlich é uma boa aproximação para concentrações acima de 0,355 kg/m³, já a isoterma de Langmuir descreve bem esta relação quando a concentração de cloretos livres é menor que 1,733 kg/m³. Vale ressaltar que Tuutii (1982) encontrou uma boa uma relação linear com seus dados experimentais concentrações

abaixo de 20 kg/m^3 e (SANDBERG, 1999) encontrou relações lineares para espécimes de concreto submetidas à exposição marinha. Muitos modelos preditivos consideram a isoterma linear devido a sua simplificação, já que a isoterma é constante e não depende da concentração de cloretos livres.

Martín-Pérez *et al.* (2000) também desenvolveram um modelo computacional de penetração de cloretos, assumindo o concreto saturado, para comparar a influência das diferentes isotermas nos perfis de concentração ao longo do tempo. A análise numérica considerou a difusão de cloretos sem combinação, relação linear e combinação não linear pela isoterma de Freundlich. Os resultados obtidos para 5 anos e 50 anos podem ser verificados na Figura 2.7 (a) e e Figura 2.7(b), respectivamente.

Figura 2.7 – Perfis de cloretos totais para diferentes isotermas de combinação. a) Após 5 anos de exposição. b) Após 25 anos de exposição



Fonte: Martin-Perez et al. (2000), p. 1220

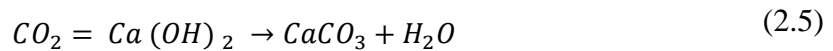
A partir da Figura 2.7, percebe-se que ao longo do tempo a diferença entre as isotermas passa a ser mais significativa para a concentração de cloretos, sendo a não consideração de combinação de cloretos apresenta maiores concentrações de cloretos. Assim, o entendimento das propriedades de combinação e o uso de uma relação apropriada tem um impacto significativo no perfil de concentrações e, conseqüentemente, na previsão da vida útil de uma estrutura.

2.3 CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um fenômeno que consiste na difusão do gás carbônico através dos poros do material e este gás reage em meio aquoso com o hidróxido de cálcio, que é um produto resultante da hidratação do cimento Portland. Através da redução da alcalinidade devido a

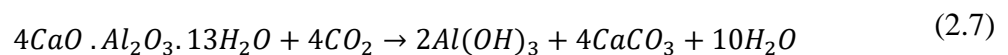
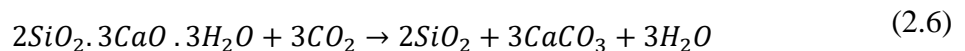
reação com o gás carbônico, as condições de estabilidade da película passivante da armadura são alteradas, dando início ao processo de corrosão (POSSAN, 2010). É importante destacar que outros gases ácidos como o gás sulfídrico e o dióxido de enxofre também pode reduzir o pH da solução nos poros do concreto e induzir a carbonatação do concreto (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A carbonatação pode ser simplificada como um processo de neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e outros compostos hidratados, pelo dióxido de carbono que precipitam como carbonato de cálcio (CaCO_3) na presença de umidade. A principal reação do processo de carbonatação pode ser representada da seguinte forma (SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993):



Como pode ser observado na equação 2.4, o dióxido de carbono reage com o hidróxido de cálcio em meio aquoso. Essa reação reduz o pH do líquido intersticial, fazendo com que ele passe de um valor maior que 12 para níveis próximos a 9 (DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001), o que diminui as condições químicas da camada passivadora da armadura.

De uma maneira simples, o processo de carbonatação pode ser dividido em 4 partes (TUUTTI, 1982). A primeira parte é a transporte do gás carbônico no concreto, ou seja, a difusão do gás nos através dos poros. Na segunda etapa o gás carbônico dissolvido na solução de poros reage com o hidróxido de cálcio (equação 2.5). Na terceira etapa, ocorre reações com silicatos e aluminatos (equação 2.7 e 2.8).

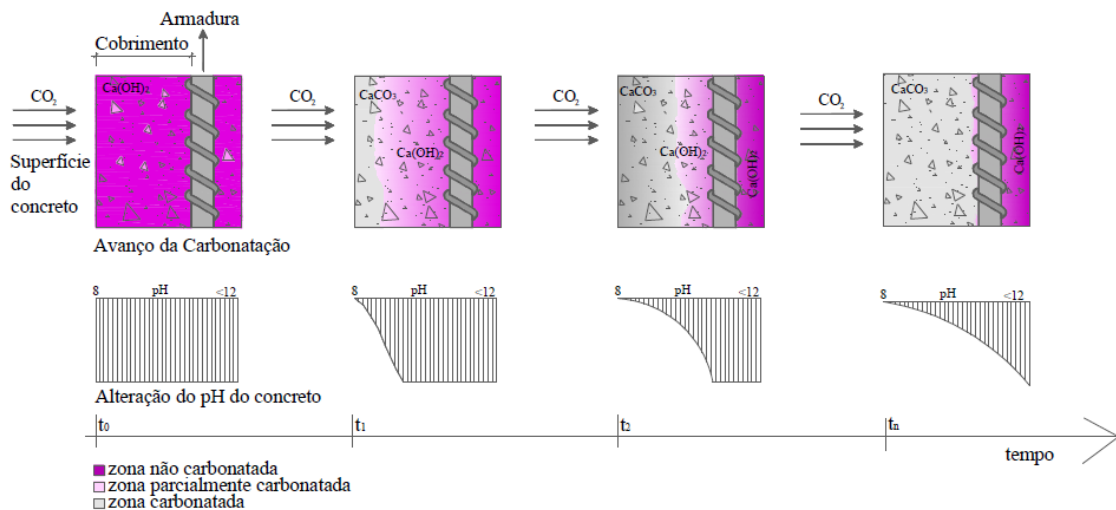


Por fim, o processo sempre produz carbonato de cálcio e água. De acordo com Montemor *et al.* (2002), o carbonato de cálcio possui baixa solubilidade e, então, precipita-se nos poros do concreto, reduzindo sua porosidade e formando uma barreira para a continuação do processo de carbonatação.

O estudo de Possan (2010) retrata o processo de carbonatação com seu início na superfície e avanço para o interior do concreto (Figura 2.8). Esse mecanismo de avanço da frente de

carbonatação altera a alcalinidade do concreto e a estrutura porosa, devido principalmente a precipitação do carbonato de cálcio resultante da reação química de gás carbônico com hidróxido de cálcio. Dessa maneira, três regiões distintas são identificadas no concreto, a área carbonatada, a parcialmente carbonatada e uma região não carbonatada.

Figura 2.8 – Frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo



Fonte: Possan (2010), p. 66

Assim, a facilidade com que o dióxido de carbono se difunde pelo cobrimento do concreto no tempo está diretamente ligado a frente de carbonatação. Assim, a difusão do CO_2 através do cobrimento do concreto no tempo especificado influencia diretamente no avanço da frente de carbonatação. De acordo com Helene (1993), a velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de CO_2 .

O ingresso do gás carbônico através da porosidade da matriz cimentante depende dos mecanismos de transporte e depende da permeabilidade, da absorção capilar, da difusão de íons e da migração de íons. Outros fatores como a temperatura, vento e umidade relativa também interferem no processo. Existem ainda fatores que pode afetar a facilidade da entrada do agente agressivo que são, a relação água/cimento, o tipo e teor de cimento, presença de adições, cura, entre outros. Além disso fatores como desvios na construção podem favorecer o ingresso de dióxido de carbono e contribuir para a carbonatação nessas áreas.

2.3.1 Efeito da carbonatação na penetração de íons cloreto no concreto

Nos últimos anos, pesquisas foram desenvolvidas envolvendo os processos de ingresso de cloretos e carbonatação, e como a atuação de ambos os mecanismos podem afetar a durabilidade de estruturas de concreto. Para concretos sujeitos a ambos os processos, a avaliação da distribuição dos íons cloretos no concreto é essencial na avaliação da vida útil e durabilidade das estruturas de concreto.

Estudos já demonstraram que o processo de carbonatação no concreto afeta o processo de difusão de cloretos no concreto com a mudança da estrutura dos poros na medida que o processo de carbonatação se mantém e na capacidade de combinação de cloretos (GLASS; BUENFELD, 1997; MEIJERS et al., 2005). Uma das principais mudanças da microestrutura do concreto é a transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, causando a diminuição da porosidade (SONG; KWON, 2007). A carbonatação modifica a microestrutura e a porosidade do concreto, consequentemente influencia consideravelmente na difusão e na permeabilidade de gases e líquidos no concreto.

A estrutura de poros muda com o processo de carbonatação, o que, geralmente, gera um decréscimo na porosidade total, enquanto a porosidade capilar aumenta (MEIJERS et al., 2005). De fato, os resultados experimentais de Ngala e Page (1997) demonstraram uma redução na porosidade devido a carbonatação para os concretos estudados. No entanto ocorreu uma redistribuição dos tamanhos dos poros a proporção de grandes poros capilares (diâmetro maior que 30nm) aumentou levemente para concretos com cimento Portland puro (OPC), mas para concretos com cinzas volantes e escória esse aumento foi ainda mais significativo. Ainda de acordo com os autores, a estrutura dos poros do concreto é alterada com o processo de carbonatação, a extensão dessa mudança depende do tipo de ligante usado. De maneira geral houve uma redução da porosidade nos concretos com OPC, com 30% de adição de cinza volante e com 65% de adição de escória de alto forno.

Seguindo a pesquisa anterior, Villain e Thiery (2005) avaliaram o efeito do processo de carbonatação na mudança da microestrutura do concreto e das propriedades de ingresso de dióxido de carbono. Segundo os autores, para os concretos analisados, a porosidade total é reduzida, poros pequenos ($\approx 30\text{nm}$) são preenchidos pelos produtos da carbonatação e aparecem poros maiores. Assim, a permeabilidade do cobrimento do concreto sofre mudanças com a carbonatação juntamente com mudanças na porosidade capilar.

Além da mudança na microestrutura, outro fator importante do ingresso de cloretos e carbonatação atuando conjuntamente, é a possibilidade dos cloretos fixados aos hidratos de cimentos serem “descombinados” e se tornarem solúveis, devido a deterioração dos hidratos de cimento causada pela carbonatação (SAEKI, 2002). Assim, o processo da carbonatação, que pode resultar na liberação de cloretos combinados para a solução de poros, aumentando a quantidade de cloretos livres (NEVILLE, 1995). De acordo com Puatatsananon e Saouma (2005), carbonatação diminui o pH e então afeta a dissociação dos cloretos combinados na forma de sais de Friedel. Segundo os autores, a solubilidade dos sais de Friedel aumenta com o grau de carbonatação do concreto.

Na pesquisa realizada por Ye et al. (2016) , os autores perceberam que a carbonatação pode diminuir a quantidade de cloretos totais e livres na região carbonatada e aumentar a quantidade de cloretos na frente de carbonatação. Os autores constataram que a carbonatação provoca consideravelmente redistribuição dos cloretos livres e combinados, apresentando movimento dos íons cloretos das regiões carbonatadas para não carbonatadas. Os autores realizaram ensaios com concreto com adições de cinza volante, verificando a maior vulnerabilidade desses concretos devido a menor quantidade de portilândia.

Os testes experimentais de Lee et al. (2013) demonstraram que a penetração de cloretos é mais nítida quando o processo de carbonatação é combinado com a penetração de cloretos. Os autores identificaram que a relação de cloretos livres para cloretos totais aumentou em ensaios de penetração de cloretos com carbonatação. Além disso, sua pesquisa demonstrou que, pelo ensaio acelerado de carbonatação e penetração de cloretos, a concentração de cloretos para concretos com adição de cinza volante é maior do que apenas para concretos sem adições. Dessa maneira, essa seção visa apenas esclarecer como a carbonatação pode influenciar o transporte de cloretos no concreto.

2.4 MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

O uso de modelos de vida útil vem se tornando uma ferramenta necessária para os projetos estruturais na engenharia, seja para a construção de novas estruturas, para verificar a manutenção durante o tempo de operação, análises preventivas de riscos ou ainda para análise do ciclo de vida (VESIKARI, 2009). Assim, através das leis de difusão e leis de reações

químicas, iniciou-se os modelos de vida útil que tentavam explicar como os agentes agressivos se comportam na difusão e como estão quimicamente ligados a matriz do concreto. Essas expressões foram ainda baseadas na lei de conservação de massa (MARTÍN-PÉREZ, 1999).

Atualmente, existem vários modelos numéricos para tentar simular os mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras. Esse fato vem do interesse na comunidade técnico-científica mundial para estabelecer de maneira confiável os parâmetros necessários para a modelagem dos diversos fenômenos de degradação que ocorrem nas estruturas de concreto (ANDRADE, 2001). Os modelos são diversos devido à enorme quantidade de variáveis para simular realisticamente os mecanismos de ingresso dos agentes agressivos, que inclui a complexidade do fenômeno da corrosão, do concreto, as diferentes condições ambientais e ainda a geometria da estrutura que está em análise. No entanto, essa complexidade dos modelos torna difícil incorporar o uso destes na engenharia.

Atualmente, existe uma demanda para incorporar dentro das normas mais conceitos relacionados a durabilidade do concreto para melhor prever o comportamento do material e evitar deterioração, no entanto, engenheiros ainda estão relutantes para introduzir esse tipo de modelo em leis nacionais e códigos estruturais (ANDRADE et al., 2013). Cada modelo tem sua particularidade, que é importante destacar afim de entender a interação considerada pelo autor do modelo. A partir disso, o responsável pelo projeto de durabilidade ou pela análise do tempo de vida útil em estruturas existentes pode escolher a melhor abordagem para a análise.

De acordo com Andrade et al. (2013), pode-se considerar três diferentes categorias, dependendo no nível de confiabilidade para concepção de estruturas de concreto, são elas: determinística, semi-probabilística e probabilística.

Ainda segundo os autores, em relação ao tipo de verificação da durabilidade, três níveis são normalmente utilizados:

1. Métodos prescritivos já definido nos presentes códigos de engenharia, conhecido como método “*deemed to satisfy*”.
2. Uso de indicadores de performance, podendo ser definido pelas propriedades do concreto ou pelos resultados da performance do material.
3. Modelos que consideram o tempo de forma explícita na formulação.

É importante destacar que o uso de diferentes métodos para uma mesma estrutura pode levar a diferentes sugestões do concreto ideal ou vida útil da estrutura. Assim, a definição de durabilidade para uma estrutura não é uma tarefa fácil, o que necessita de uma cuidadosa verificação dos resultados e um conhecimento do próprio processo da corrosão.

Categorias de verificação da durabilidade segundo Andrade et al. (2013):

- a) Categoria 1: Regras “deemed to satisfy”: Essa abordagem é comumente utilizada nos códigos estruturais, que envolve delimitar uma determinada propriedade, como a relação água/cimento e quantidade mínima de cimento ou, ainda, tipo de cimento. Essa categoria é baseada na experiência e pode ser considerada válida para a maioria das estruturas que estão localizadas em ambientes não agressivos. As matérias-primas do concreto devem estar dentro do limite para atender a durabilidade requerida.
- b) Categoria 2: Indicadores de performance: As formas mais modernas para um projeto de durabilidade são através da definição de “performance”. Para atingir a performance adequada, certa propriedade do concreto precisa estar dentro do exigido. Nessa categoria é definido alguns testes de performance do material. Essa categoria atrai a atenção de projetistas, porque os testes são acelerados e, na maioria dos casos, possuem baixo custo. Em oposição a categoria anterior, a durabilidade requerida é o dado de entrada e as matérias-primas do concreto são os resultados.
- c) Categoria 3: Modelos: O projeto da vida útil da estrutura é considerado através de modelos analíticos ou numéricos, providenciando um limite de durabilidade. Nessa categoria, os modelos necessitam de testes de laboratório para verificar a confiabilidade dos valores definidos nos parâmetros do modelo. A resistência da estrutura e a agressividade do ambiente é calculada em função do tempo através de um modelo que pode ter diferentes graus de complexidade.

Neste trabalho serão brevemente discutidos alguns modelos de penetração de cloretos na fase de iniciação nas seções seguintes.

2.4.1 Modelos de penetração de cloretos

A difusão de cloretos no concreto é muitas vezes descrita através da 2ª lei de Fick como mencionado no capítulo anterior (equação 2.8).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

Onde C é a concentração de cloretos (kg/m^3) no tempo t (s) distância x (m) e D_c é o coeficiente de difusão de cloretos (m^2/s).

Para resolver a equação diferencial, necessita-se das condições de contorno e da condição inicial. Considerando as condições de contorno, a concentração de cloretos é igual a concentração superficial (C_s) em x igual a zero e a condição inicial, para o tempo igual a zero, a concentração inicial é igual a zero (equação 2.9)

$$C(0, t) = C_s \text{ e } C(\infty, t) = 0 \quad C(x, 0) = 0 \quad \forall x > 0 \quad (2.9)$$

A solução analítica (equação 2.10) a seguir descreve o fenômeno da difusão considerando as simplificações das condições de contorno.

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (2.10)$$

Na literatura (DA COSTA et al., 2013; LIN; LIU; XIANG, 2010) ainda se encontra uma modificação da 2ª Lei de Fick, a equação 3.3, que descreve o fenômeno da difusão-convecção de uma forma significativamente simplificada.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.11)$$

Onde C é a concentração de cloretos (kg/m^3) no tempo t (s) distância x (m), D_c é o coeficiente de difusão de cloretos (m^2/s) e v é a velocidade da convecção (m/s).

Utilizando as mesmas condições de contorno da equação 2.9. A solução analítica da equação 2.11 é descrita:

$$C(x, t) = \frac{C_s}{2} \cdot \left[\exp \left(\frac{v}{D_c} x \right) \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} + v \frac{\sqrt{D_c t}}{2u} \right) + \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} - v \frac{\sqrt{D_c t}}{2D_c} \right) \right] \quad (2.12)$$

Onde C é a concentração de cloretos (kg/m^3) no tempo t (s) distância x (m), D_c é o coeficiente de difusão de cloretos (m^2/s), C_s é a concentração superficial e v é a velocidade da convecção (m/s).

A equação 2.10 é utilizada em muitos casos para a previsão da vida útil de estruturas de concreto. No entanto, seu uso deve ser feito com cautela, devido as simplificações utilizadas para chegar ao seu formato. Vários autores destacam que a solução analítica tem várias limitações (ANDRADE et al., 2006, 2013; ANDRADE; CASTELLOTE; D'ANDREA, 2011; MARCHAND; SAMSON, 2009; MARTÍN-PÉREZ, 1999; TANG; UTGENANT; BOUBITSAS, 2015) (TANG et al., 2015) como o uso apenas unidimensional, tendência a superestimar as concentrações de cloreto para exposições de longa duração e uso do coeficiente de difusão constante. É importante destacar que as simplificações e as hipóteses consideradas para o uso da equação 2.10 como, concentração constante de íons na superfície, condições do ambiente constante e características do concreto constante durante toda a fase de operação não são cumpridas na maioria das situações.

Os autores Thomas e Bamforth (1999) verificaram que existe uma dependência no tempo no transporte de íons para concretos com teores de escória e cinza volante. Luping e Gulikers (2007) verificaram que a solução analítica pode significativamente superestimar a concentração de cloretos, e a solução pode ser moderadamente utilizada para prever a penetração de cloretos para concreto com cimento Portland, quando se considera o coeficiente de difusão de cloretos dependente do tempo. No entanto, os autores verificaram que para o concreto com adição de cinzas volantes, a quantidade de cloretos penetrados no concreto é significativamente subestimada. Song, Lee e Ann (2008) propuseram formulações para que o coeficiente aparente de difusão seja dependente do tempo para ser substituído na solução analítica.

Com o avanço dos modelos, o transporte de íons cloretos no concreto foi objeto de estudo de vários autores que simularam o processo através de modelos que utilizam teorias matemáticas, como o método dos elementos finitos e programas computacionais mais sofisticados. Esses modelos foram surgindo com o intuito de incluir características do material, situações do ambiente ou novas reações que não são contempladas pelas equações.

Assim, o modelo proposto por Saetta, Scotta e Vitaliani (1993) utilizaram as equações diferenciais que representam o transporte de umidade, a variação da temperatura e a difusão de cloretos de maneira acoplada pelo método dos elementos finitos. Os autores examinaram a difusão de cloretos para concretos saturados e parcialmente saturados, considerando a variabilidade de difusão de íons dependendo das características do concreto. Além disso, o estudo foi talvez o primeiro a considerar a temperatura e umidade variantes no concreto, que influenciam também o transporte de íons cloreto.

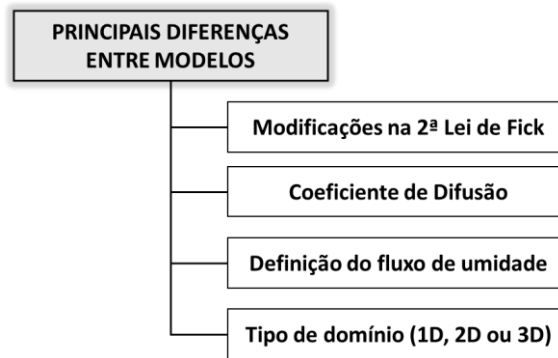
Outros modelos, com o uso de métodos numéricos para resolver a equação diferencial da 2ª Lei de Fick, sucederam os autores adicionando outros fatores de influência no transporte de íons, considerando outras condições de contorno e diferentes parâmetros em cada abordagem (BAROGHEL-BOUNY; NGUYEN; DANGLA, 2009; CONCIATORI; SADOUKI; BRÜHWILER, 2008; DOMINICINI, 2016; MARTÍN-PÉREZ, 1999; MEIJERS et al., 2001; SUZANO, 2017; TAVARES, 2013; VAN DER ZANDEN; TAHER; ARENDS, 2015). Outros autores analisaram o efeito das cargas mecânicas na difusão de cloretos (WU et al., 2016).

Muitos modelos investigaram o efeito dos cloretos combinados na matriz do concreto que influenciam na quantidade total de cloretos no concreto sendo considerados nos modelos subsequentes (GLASS; BUENFELD, 1997; MARTÍN-PÉREZ, 1999; TANG; NILSSON, 1995). Alguns modelos retratam o transporte de cloretos na situação em que as estruturas estão submetidas a ciclos de secagem e molhagem (MARTÍN-PÉREZ, 1999; WU et al., 2016). Modelos mais complexos consideram fissuras no concreto (ISHIDA; IQBAL; ANH, 2009; MARSAVINA et al., 2009; OŽBOLT et al., 2010).

Como pode ser observado existem vários modelos na literatura para descrever o fenômeno da corrosão por íons cloreto. Completas revisões bibliográficas dos modelos que descrevem as equações de cada autor podem ser verificadas em de Oliveira Andrade (2001) e Suzano (2017). A partir do que foi evidenciado anteriormente, percebe-se que existe uma grande dispersão de modelos, o que favorece uma confusão para o usuário de modelos de previsão de vida útil, o que faz com que este opte pela equação analítica 2.10. Dessa forma, essa dissertação focou-se em esclarecer os pontos-chaves dos modelos numéricos para que seja possível uma escolha lógica pelo usuário.

Todo modelo numérico inicia-se com a 2ª Lei de Fick. No entanto, essa lei é modificada seguindo os critérios de cada autor. As principais diferenças encontradas depois de uma análise detalhada entre os modelos de previsão de vida útil para o período de iniciação são: modificações na 2ª lei de Fick, o cálculo do coeficiente de difusão de cloretos, definição do fluxo de umidade, coeficiente de difusão de umidade, condições de contorno da equação de Fick e tipo de domínio (unidimensional ou bidimensional) (Figura 2.9).

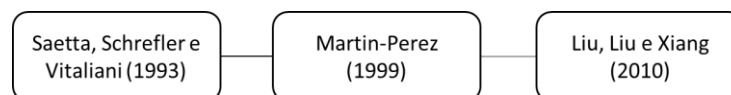
Figura 2.9 – Principais diferenças entre modelos numéricos



Fonte: Autora

Para situar o leitor nas diferenças dos modelos de penetração de cloretos no concreto e para esclarecer para um futuro usuário de modelos, essa autora selecionou três trabalhos científicos (Figura 2.10) mais destacados na literatura para evidenciar as variáveis e parâmetros das equações. Outros modelos podem ser encontrados na literatura, Andrade (2001) e Suzano (2017) abordam alguns dos principais modelos de penetração de cloretos em suas revisões bibliográficas. O objetivo é situar o leitor para os principais variáveis e parâmetros encontrados em modelos numéricos.

Figura 2.10 – Modelos numéricos selecionados



Fonte: Autora

Apesar da Figura 2.10 fornecer uma visão no tempo dos autores, nenhum modelo de previsão ainda é aceito na comunidade técnico-científica. E o modelo mais novo não significa que é o mais utilizado. As Tabelas 2.6 a 2.9 descrevem, respectivamente, as diferenças evidenciadas pelos modelos, modificação na 2ª Lei de Fick, coeficiente de difusão de cloretos, fluxo de umidade e coeficiente de difusão de umidade.

Tabela 2.6 – Formulação da 2ª Lei de Fick entre modelos numéricos

Autor	Modificações na 2ª Lei de Fick	Fatores
2ª Lei de Fick difusão	$\frac{\partial C_{ct}}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C_{ct}}{\partial x^2}$	- C_{ct} : concentracao total de cloretos (kg/m3) - D_c : coeficiente de difusao de cloretos (m/s2)
2ª Lei de Fick difusão-convecção	$\frac{\partial C_{ct}}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C_{ct}}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_{ct}}{\partial x}$	- C_{ct} : concentracao total de cloretos (kg/m3) - D_c : coeficiente de difusao de cloretos (m/s2) - v : velocidade da convecção (m/s)
(SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993)	$\frac{\partial C_{ct}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c \cdot \frac{\partial C_{ct}}{\partial x} \right) + \frac{C_{ct}}{\alpha} \frac{\partial w}{\partial t}$	- D_c : coeficiente de difusao de cloretos efetivo (m/s2) - w : quantidade efetiva de humidade (m3/m3) - α : coeficiente que leva em consideração a capacidade de combinação do concreto
(MARTÍN-PÉREZ, 1999)	$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right)$	- C_{fc} : concentracao de cloretos livres (kg/m3) - h : umidade relativa dos poros - D_c^* : aparente coeficiente de difusao de cloretos (m2/s) - D_h^* : aparente coeficiente de difusão de umidade (m2/s)
(LIN; LIU; XIANG, 2010)	$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(s D_c \cdot \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(s C_{fc} D_\theta \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$	- D_c : coeficiente de difusao de cloretos efetivo (m/s2) - s : porosidade do concreto. - θ : grau de saturacao da água nos poros - D_θ : coeficiente de difusão de humidade (m/s2)

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2.7 – Formulação do coeficiente de difusão de cloretos entre modelos numéricos

Autor	Coeficiente de Difusão de cloretos	Fatores
2ª Lei de Fick difusão	$D_c = \text{constante}^a$	- D_c : coeficiente de difusão de cloretos (m/s ²)
2ª Lei de Fick difusão-convecção	$D_c = \text{constante}^a$	- D_c : coeficiente de difusão de cloretos (m/s ³)
(SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993)	$D_c = D_{c,ref} \cdot F_1(h) \cdot F_2(T) \cdot F_3(t)$	- D_c : coeficiente de difusão de cloretos efetivo (m/s ²) - $D_{c,ref}$: coeficiente de difusão de referência (m ² /s) - $F_1(h), F_2(T), F_3(t)$: fatores que consideram a influência da umidade, temperatura e tempo de exposição
(MARTÍN-PÉREZ, 1999)	$D_c = D_{c,ref} \cdot F_1(h) \cdot F_2(T) \cdot F_3(t) ; D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \cdot \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}}$	- C_{fc} : concentração de cloretos livres (kg/m ³) - h : umidade relativa dos poros - D_c : coeficiente de difusão de cloretos efetivo (m/s ²) - D_c^* : aparente coeficiente de difusão de cloretos (m ² /s) - w_e : quantidade de água evaporável (m ³ de água/m ³ de concreto) - $\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}$: capacidade de combinação (m ³ de solução dos poros/m ³ de concreto)
(LIN; LIU; XIANG, 2010)	$D_c = D_{c,ref} \cdot F_1(h)^* \cdot F_2(T) \cdot F_3(t) \cdot F_4(d)$	- D_c : coeficiente de difusão de cloretos efetivo (m/s ²) - s : porosidade do concreto. - θ : grau de saturação da água nos poros - D_θ : coeficiente de difusão de humidade (m/s ²) - $F_4(d)$: fator que considera o decaimento estrutural

Nota: a) Na maioria dos casos o D_c é considerado constante

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2.8 – Diferenças no fluxo de umidade entre modelos numéricos

Autor	Fluxo de Umidade	Fatores
2ª Lei de Fick difusão	Não considera	-
2ª Lei de Fick difusão-convecção	Não considera	-
(SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993)	$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - D_c: coeficiente de difusão de cloretos efetivo (m/s²) - w: quantidade efetiva de umidade (m³/m³) - α: coeficiente que leva em consideração a capacidade de combinação do concreto
(MARTÍN-PÉREZ, 1999)	$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - C_{fc}: concentração de cloretos livres (kg/m³) - h: umidade relativa dos poros - D_c^*: aparente coeficiente de difusão de cloretos (m²/s) - D_h^*: aparente coeficiente de difusão de umidade (m²/s)
(LIN; LIU; XIANG, 2010)	$\frac{\partial (s\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(sD_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - D_c: coeficiente de difusão de cloretos efetivo (m/s²) - s: porosidade do concreto. - θ: grau de saturação da água nos poros - D_θ: coeficiente de difusão de umidade (m/s²)

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2.9 – Diferenças no coeficiente de difusão de umidade entre modelos numéricos

Autor	Coeficiente de difusão de umidade	Fatores
2ª Lei de Fick difusao	-	-
2ª Lei de Fick difusao-conveccao	-	-
(SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993)	$D_h = D_{h,ref} \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \cdot f_3(t)$	<p>- $D_{h,ref}$: coeficiente de difusão de umidade de referência (m²/s)</p> <p>- $f_1(h), f_2(T), f_3(t_e)$: fatores que consideram a influência da umidade, temperatura e tempo de exposição</p>
(MARTÍN-PÉREZ, 1999)	$D_h = D_{h,ref} \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \cdot f_3(t) ; D_h^* = \frac{D_h}{1 + \frac{1}{w_e} \cdot \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}}$	<p>- D_h: coeficiente de difusão de umidade efetivo (m²/s)</p> <p>- D_h^*: aparente coeficiente de difusão de umidade (m²/s)</p> <p>- w_e: quantidade de água evaporável (m³ de água/m³ de concreto)</p> <p>- $\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}$: capacidade de combinação (m³ de solução dos poros/m³ de concreto)</p>
(LIN; LIU; XIANG, 2010)	$D_h = \begin{cases} D_{d,ref} \cdot F_{1d}(h) \cdot F_2(T) \cdot F_3(t) F_4(d) \\ D_{w,ref} \cdot F_{1w}(h) \cdot F_2(T) \cdot F_3(t) F_4(d) \end{cases}$	<p>- D_c: coeficiente de difusao de cloretos efetivo (m/s²)</p> <p>- $D_{d,ref}$: coeficiente de difusão durante secagem</p> <p>- $D_{w,ref}$: coeficiente de difusão durante molhagem</p> <p>- $F_{1d}(h), F_2(T), F_3(t_e), F_4(d)$: fatores que consideram umidade, temperatura, tempo de exposição e decaimento estrutural</p>

Fonte: Elaborado pela autora

A partir da Tabela 2.6, pode-se verificar que a 2ª Lei de Fick sofre várias alterações, dependendo do modelo numérico considerado. A 2ª Lei de Fick define como o modelo considera o processo de difusão, ou seja, como ele considera o processo de transporte de íons cloreto dentro dos poros do concreto através do cobrimento do concreto. A solução dessa equação é a concentração de cloretos na distância requerida, por exemplo, se o cobrimento é de 4 mm, a concentração de cloretos em 4 mm será calculada (ou na distância definida pelo usuário). Portanto, as diferenças nessa formulação evidenciam como o modelo calcula a concentração de cloretos no concreto.

Ainda de acordo com a Tabela 2.6, pode-se verificar que existem modelos com duas parcelas a direita da equação de Fick, a primeira parcela descreve o processo de difusão e a segunda parcela, considera o processo de convecção (seção 2.2.1 apresentou esses fenômenos). O termo convectivo nessas formulações representa a contribuição da água de transportar cloretos para dentro do concreto quando esse fenômeno ocorre, para as situações em que o concreto está em condições de secagem, esse termo é igual a zero, já que os cloretos permaneceram na superfície do concreto enquanto a água evapora. A partir de Saetta, Scotta e Vitalini (1993), no processo de convecção é considerada a influência da umidade, no entanto cada autor refere a esse umidade de uma forma diferente. Para esses autores, o fluxo é descrito pela quantidade de água evaporável.

No entanto, Martín-Perez (1999) descreve o fluxo de umidade no concreto em função da umidade relativa dos poros (h) no lugar da quantidade de água evaporável. A autora descreve que a distribuição de água evaporável (w) se torna não uniforme com o tempo, tornando a programação mais complexa. Assim, a autora faz uso de isotermas de adsorção para descrever o comportamento relativo da umidade dos poros com a quantidade de água evaporável ($\frac{\partial w_e}{\partial h}$); esse termo é calculado pelo fluxo de umidade (Tabela 2.7). Em contrapartida, Lin, Liu e Xiang (2010) definem seu fluxo de cloretos devido a convecção de maneira não linear em função da porosidade (s) e do grau de saturação de água nos poros de concreto (θ).

Outra particularidade interessante das formulações da 2ª Lei de Fick é que tipo de força motriz foi levada em consideração. Existem modelos que consideram a concentração de cloretos totais como força motriz e outros, a concentração de cloretos livres. De acordo com Tang et al. 2015, os modelos que assumem a concentração de cloretos totais no processo de difusão são teoricamente questionáveis, já que apenas os cloretos livres podem se mover na solução dos poros e contribuir para a corrosão da armadura do concreto (fato destacado na seção 2.2.5).

Pela Tabela 2.6 é possível distinguir quais modelos consideram cloretos totais ou livres. Uma observação é sobre o modelo de Saetta et al. (1993) que apesar de considerar cloretos totais, ele considera um fator (α) que simboliza a interação entre cloretos livres e cloretos totais de forma linear.

É de conhecimento geral que o coeficiente de difusão é o parâmetro mais importante da formulação da 2ª Lei de Fick. Assim, a Tabela 2.7 demonstra as principais diferenças entre os modelos e esse parâmetro. Como comentado na seção 2.2.2, o coeficiente de difusão sofre influência de diversos parâmetros principalmente da humidade, tempo de exposição e temperatura, dependendo do caso e do ambiente da estrutura.

Dessa forma, os autores dedicam-se a incluir os parâmetros de humidade, temperatura e tempo de exposição no coeficiente de difusão a partir das funções $F_1(h)$, $F_2(T)$ e $F_3(t_e)$, respectivamente (Tabela 2.7). Uma diferença é do modelo de Lin, Lin e Xiang (2010) que adiciona um quarto fator para incluir no seu modelo o decaimento da performance estrutural das estruturas de concreto quando submetidas ao processo de degradação. O autor considera dois tipos de decaimento estrutural no seu estudo, primeiro em relação a expansão/contratação térmica sofrida pela estrutura e segundo, em relação a transferência de umidade e associado a expansão na molhagem e encolhimento na secagem. A Tabela 2.10 mostra as formulações dessas funções.

Tabela 2.10 – Funções para o coeficiente de difusão de cloretos

Parâmetros	Formulações	Fatores
Efeito da temperatura	$F_2(T) = \exp \left[\frac{U_{cl}}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$	U : energia de ativação do processo de difusão de cloretos (kJ/mol) R : constante do gás (8,314 x 10 ⁻³ kJ/K.mol) T_{ref} : Temperatura de referência onde o cloreto de difusão de referência foi calculado (K) T : temperatura do concreto (K)
Efeito do tempo de exposição	$F_3(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m$	t_{ref} : tempo de exposição que o cloreto de difusão de referência foi medido (s) t : atual tempo de exposição (s) m : fator de redução da idade
Efeito da humidade relativa	$F_1(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1}$	h_c : humidade que D_c decai metade entre os valores máximos e mínimos (0,75)

		h : humidade
Efeito da humidade relativa (Lin et al 2010)	$F_1(h)^* = h^n$	n : power index
		h : humidade
Efeito do decaimento estrutural	$F_4(d) = 1 + \frac{D_{c,max}}{D_{c,ref}} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{d_{cr}} \right)^m \right]^{-1} \right\}$	- m : fator de redução da idade
		- $\frac{D_{c,max}}{D_{c,ref}}$: 8 (Lin et al, 2010)
		- d_{cr} : parâmetros do modelo
		- d : decaimento da performance estrutural

Fonte: Autora

Como pode ser observado, várias variáveis são incluídas nos modelos, que dependem, principalmente, do tipo de concreto. A explicação de cada fator e o grau de influência desses fatores não faz parte do escopo dessa dissertação, visto que já foi descrito detalhadamente em diversas referências (ANDRADE, 2001; DOMINICINI, 2016; FERREIRA, 2004; LIN; LIU; XIANG, 2010; MARTÍN-PÉREZ, 1999; SUZANO, 2017; TAVARES, 2013).

Devido à complexidade, o uso da 2ª Lei de Fick clássica, normalmente, utiliza-se o coeficiente de difusão constante, principalmente quando o autor utiliza a solução analítica (equação 2.10 ou equação 2.12) para seu modelo. Como já foi destacado as soluções analíticas tendem a supervalorizar as concentrações de cloreto para exposições de longo prazo, especialmente devido ao uso do coeficiente de difusão constante (PRADELLE; THIÉRY; BAROGHEL-BOUNY, 2017; SONG; KWON, 2007; TANG et al., 2015; ZHANG; LOUNIS, 2006). Para reduzir esse problema, muitos autores adicionam os fatores mais apropriados para o caso que estão analisando. Nessa linha, Cavalaro et al. (2015) adicionou o fator da temperatura no modelo utilizado, já que para o seu caso de estudo a temperatura tinha um grande efeito. Luping e Gulikers (2007) adicionaram no seu modelo a dependência do coeficiente de difusão com o tempo, de acordo com os autores, a não inclusão desse fator superestima a concentração de cloretos em muitas ordens de magnitude. Outros autores também adicionaram o fator ou fatores que mais conveniava para seu caso de análise (CAVALARO et al., 2015; DOMINICINI; SUZANO; CALMON, 2016; FERREIRA, 2004; LUPING; GULIKERS, 2007; POLDER; DE ROOIJ, 2005; TAVARES, 2013).

A terceira diferença dos modelos numéricos destacada nessa dissertação é em relação ao fluxo de umidade no concreto (Tabela 2.8). Como descrito na tabela 2.5, a segunda parcela da 2ª Lei de Fick modificada é a inclusão matemática do processo de convecção. Essa parcela inclui o

valor da umidade em cada *distância* x do concreto. Como a umidade não é constante, ela é calculada para a profundidade ou área do concreto a partir de uma outra equação diferencial de difusão. Esse fator é o que mais sofre modificação no modelo, devido a grande divergência na literatura de como definir a distribuição de umidade no concreto e como representar esse fluxo. O transporte de umidade no concreto usualmente envolve a combinação de vários mecanismos que inclui difusão de água, evaporação, permeabilidade e sorptividade (CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 1999; LIN; LIU; XIANG, 2010) . A Tabela 2.8 descreve as formulações para o fluxo de umidade para cada modelo considerado. Os três modelos consideram apenas a difusão para descrever o fluxo de umidade no concreto. Uma observação importante é que o fluxo de umidade deve ter coerência com a convecção considerada na 2ª Lei de Fick (Tabela 2.6 e Tabela 2.9).

Finalmente, existe a diferença entre os modelos de como foi definido o coeficiente de difusão de umidade (Tabela 2.9). Para o coeficiente de difusão de umidade, Lin, Lin, Xiang (2010) considera dois coeficientes de umidade, um para representar quando o concreto é parcialmente saturado e sofre o fenômeno da capilaridade (molhagem) e outro para os períodos secos, aonde a umidade é dirigida para fora do concreto a partir do interior por evaporação da água ou por difusão do vapor. Assim, o autor considera o coeficiente de difusão para períodos de molhagem e um coeficiente de difusão de humidade para os períodos de secagem (Tabela 2.9). Como o coeficiente de difusão de cloretos, a temperatura, a própria umidade e o tempo de exposição do concreto interferem no coeficiente de difusão de umidade. Dessa forma, os autores dedicam-se a incluir esses parâmetros a partir das funções $f_1(h)$, $f_2(T)$ e $f_3(t_e)$, respectivamente. A Tabela 2.11 mostra as formulações dessas funções.

Tabela 2.11– Funções para o coeficiente de difusão de umidade

Parâmetros	Formulações	Fatores
------------	-------------	---------

Efeito da temperatura	$F_2(T) = \exp\left(\frac{U_m}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)$	U_m : energia de ativação do processo de difusão de humidade (kJ/mol) R : constante do gás ($8,314 \times 10^{-3}$ kJ/K.mol) T_{ref} : Temperatura de referência onde o cloreto de difusão de referência foi calculado (K) T : temperatura do concreto (K)
Efeito do tempo de exposição	$F_3(t_e) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}}$	t_{ref} : tempo de exposição que o cloreto de difusão de referência foi medido (s) t : atual tempo de exposição (s) m : fator de redução da idade
Efeito da humidade relativa	$F_1(h) = F_{1d}(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^n}$	α_0 : parâmetro que representa a razão $D_{h,min}/D_{h,max}$. Esses valores foram encontrados para diferentes concretos por Bazant and Najjar (1971,1972). Os valores deram próximos de 0,05.
Efeito da humidade relativa	$F_{1w}(h) = \exp(nh_r)$	- n : constante empírica determinada - h_r : degree da água saturada normalizada
Efeito do decaimento estrutural	$F_4(d) = 1 + \frac{D_{c,max}}{D_{c,ref}} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{d_{cr}} \right)^m \right]^{-1} \right\}$	- m : fator de redução da idade - $\frac{D_{c,max}}{D_{c,ref}}$: 8 (Lin et al, 2010) - d_{cr} : parâmetros do modelo - d : decaimento da performance estrutural

Fonte: Elaborado pela autora

De fato, cada modelo numérico tem sua particularidade e parâmetros que foram destacados na sua formulação e desenvolvimento. Seguindo as Tabelas 2.6 a 2.9, o usuário de um modelo numérico deve identificar como este considera seus principais parâmetros, a começar pelas principais diferenças destacadas nessa dissertação (Figura 2.9).

Apesar do modelo de Saetta, Scotta e Vitaliani (1993) ser o primeiro modelo, muitas informações ficaram incertas no seu artigo, o que gera muita incerteza na sua utilização, o que criou a necessidade do desenvolvimento de outros modelos numéricos. O modelo de Martín-Perez (1999) foi desenvolvido baseando-se no modelo do anterior, a partir de modificações da 2ª lei de Fick e equação de fluxo de umidade (Tabela 2.6 a 2.9). Esse modelo é muito utilizado na literatura, como ponto de partida para diversos trabalhos (BAROGHEL-BOUNY et al., 2012; BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011; TAVARES, 2013; ZHU et al., 2016) na tentativa de verificar o comportamento deste modelo em outras situações, com outros materiais e condições ambientais. Apesar de ter sido desenvolvido de forma bidimensional, Martín-Perez

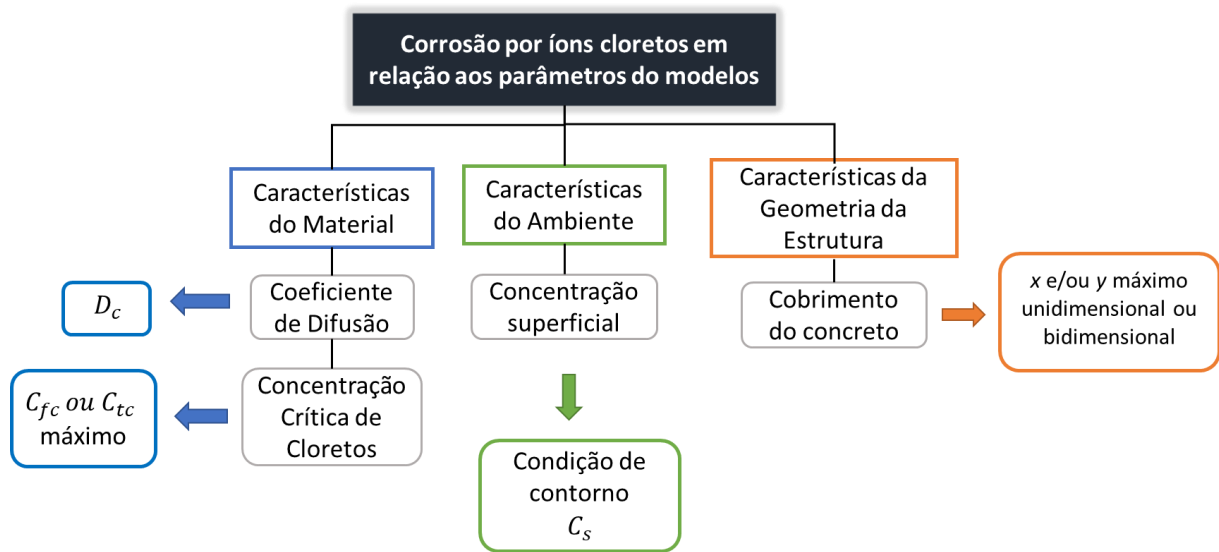
(1999) não analisa seu modelo dessa forma, assim no trabalho de Bastidas-Arteaga et al. (2011), os autores utilizam o modelo da autora para outras condições de exposição e para exemplos bidimensionais. Outro exemplo interessante, é o trabalho de Zhu et al. (2016) que considera o modelo de cloretos de Martin-Perez (1999) para seu modelo combinado de cloretos e carbonatação. Ainda assim, o uso do modelo de Martin-Perez (1999) poderia ser verificado em outras situações como para estruturas marinhas e outros exemplos bidimensionais, já que a autora e seu sucessor Bastidas-Arteaga et al. (2011) utilizaram para o exemplo de saís de degelo. Dessa forma, ainda é incerta a eficiência deste modelo.

Em seguida, Lin, Liu e Xiang (2010) estabeleceram uma mudança interessante até então não mencionada com muitos detalhes nos modelos numéricos. Para simular com mais exatidão os ciclos de molhagem e secagem nas estruturas marinhas, os autores estabeleceram dois coeficientes de difusão de umidade, um para secagem e um para molhagem (Tabela 2.8), como destacado anteriormente. Fato também observado no estudo de Li, Li e Chen (2009) sobre a diferença de difusividade da água para molhagem e secagem, evidenciando que os dois coeficientes não poderiam ser iguais devidos as diferenças no transporte. Assim, os autores puderam estabelecer ciclos de molhagem e secagem mais verdadeiros. No entanto, suas simulações no tempo apenas evidenciam exemplos com ciclos longos, o que pode não representar todas as variações de marés. Outro ponto interessante desse modelo é a acréscimo de uma nova função no coeficiente de difusão para incluir o decaimento da performance estrutural do concreto (Tabela 2.6).

Um dos maiores desafios ainda na modelagem de penetração de cloretos é referente aos ciclos de molhagem e secagem (em inglês: *tidal zone*), consequentemente, na melhor representação da variação da umidade no concreto. Como pode ser observado, apesar de ter uma evolução no tempo, os modelos apresentados nessa dissertação (Figura 2.10), ainda apresentam muita incerteza na sua utilização, sendo ainda necessário, principalmente, uma validação com situações de longa exposição (Andrade 2013).

Como mencionado na seção 2.2.1 (Figura 2.4), os principais fatores que interferem o processo de difusão são: Coeficiente de difusão, concentração superficial, cobrimento do concreto e a concentração superficial. No entanto a dúvida é como os modelos consideram esses importantes fatores no seu desenvolvimento. Assim, pode-se fazer uma relação com os parâmetros e variáveis abordados nos modelos e com os principais fatores que afetam o transporte de cloretos no concreto. A Figura 2.11 esclarece essa relação.

Figura 2.11 – Principais fatores e variáveis para o transporte de cloretos



Fonte: Autora

De acordo com a Figura 2.11, os fatores mais importantes no transporte de cloretos podem ser verificados na formulação dos modelos. Portanto, é evidente que entender como o modelo calcula e considera cada fator é crucial para a escolha de um modelo de penetração de cloretos. Como visto anteriormente nessa seção existem diversas maneiras de calcular o coeficiente de difusão e cada modelo tem sua particularidade em relação a essa variável. A concentração de cloretos é calculada pela 2ª Lei de Fick e sua concentração crítica depende principalmente, no quão rápido essa concentração vai ser atingida, que depende da formulação considerada pelo modelo na 2ª Lei de Fick. Em relação a condição de contorno, que é utilizada para a resolução da equação diferencial. Por fim, modelos unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais podem também influenciar o resultado.

CAPÍTULO 3

MODELO NÚMÉRICO

3 MODELO NÚMERICO – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E ESTRUTURA

3.1 MODELO PROPOSTO

O modelo proposto nesta dissertação segue a continuação de pesquisas desenvolvidas anteriormente pelo grupo de pesquisa Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil (NDCC) da UFES, que está registrado no diretório de grupos de pesquisa do Brasil. O grupo participa de ensaios de laboratório através do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LEMAC) e na área de modelagem, otimização e simulação computacional de sistemas e processos. As pesquisas desenvolvidas que envolvem modelagem numérica da corrosão das armaduras iniciaram com o modelo de Dominicini (2016), em seguida aperfeiçoado por Suzano (2017).

Para resolução das equações diferenciais, o modelo numérico desenvolvido nessa dissertação segue a metodologia apresentada por Suzano (2017) e Martín-Perez (1999). Suzano (2017) considerou softwares livres no desenvolvimento da sua pesquisa, o que contribui para melhorar o desempenho do modelo. A montagem do software da autora e a integração numérica foi utilizada no modelo proposto nesta dissertação. No entanto Suzano (2017) utilizou como base as equações de Lin, Liu e Xiang (2010) e Martín-Perez (1999) para formar seu modelo. O modelo proposto nesta dissertação foi desenvolvido baseado no modelo de Martín-Perez (1999) e Saetta, Scotta e Vitaliani (1993) para a penetração de íons cloretos, resumidamente descritos na seção 2.4.

Essa escolha é fruto da tentativa de melhorar as funções de fluxo de humidade. Os resultados de Suzano (2017) demonstraram que as equações de convecção de Lin, Liu e Xiang (2010) apresentaram maiores variações e maior instabilidade numérica que as formulações matemáticas apresentadas por Martín-Perez (1999) e Saetta, Scotta e Vitaliani (1993).

O modelo numérico desenvolvido avalia apenas o período de iniciação, descrito anteriormente na seção 2.1 (Figura 2.1), que representa o momento que o acúmulo de íons cloreto nas armaduras do concreto atinge uma concentração crítica, caracterizando a despassivação da armadura e início do período de propagação. Assim, o modelo prevê a evolução da concentração de íons cloreto durante o tempo de vida útil definido para um dado ambiente. O momento que

a concentração crítica é atingida representa o fim da vida útil. As seções seguintes descrevem a solução numérica utilizada.

3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

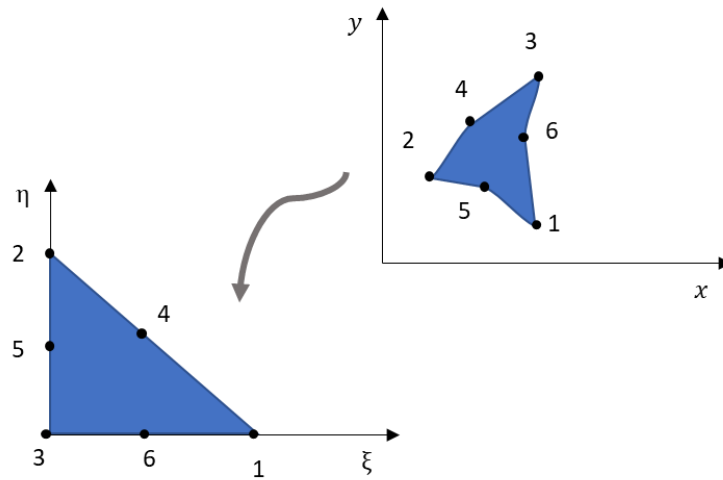
Os problemas mais complexos que envolvem geometrias, fluxos, propriedades dos materiais não é possível obter uma solução analítica com facilidade. Apesar de termos visto que para o caso da corrosão causada por íons cloreto é possível uma solução analítica, já foi descrito no capítulo 2 que esta solução não deve ser utilizada em vários casos. Assim, utiliza-se métodos numéricos para o encontro de soluções aceitáveis (LOGAN, 2007). O método dos elementos finitos (MEF) já se tornou uma aplicação matemática utilizada para várias áreas da engenharia com o objetivo de resolver as equações diferenciais parciais através da discretização do domínio. Nesse trabalho será utilizado o método de Garlekin e elementos triangulares curvos para discretizar a área do domínio.

3.2.1 Descrição dos Elementos e Integração Numérica

O modelo desenvolvido admite elementos triangulares lineares (primeira ordem) ou curvos (segunda ordem), técnica abordada por Suzano (2017). É importante destacar que essa técnica é uma inovação para os modelos de penetração de íons cloreto. Assim, o mapeamento é sempre realizado com funções quadráticas (segunda ordem) por integração numérica. Com essa característica, áreas circulares são melhores discretizadas pelo elemento triangular curvo. Procedimento raramente utilizado na literatura, que em sua maioria utilizam funções lineares. Assim, para as funções de primeira ordem, o programa admite superparametrização, para as funções de segunda ordem, o programa é isoparamétrico.

O elemento triangular curvo possui 6 nós, um em cada borda e um no meio de cada lado do triângulo, com um grau de liberdade associado a cada nó. A Figura 3.1 representa o elemento para as coordenadas locais e globais.

Figura 3.1 – Elemento triangular curvo para coordenadas locais



Fonte: Autora

As funções de forma lineares no plano $\xi \times \eta$ são definidas:

$$L_1(\xi, \eta) = \xi; \quad L_2(\xi, \eta) = \eta; \quad L_3(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta \quad (3.1)$$

E as funções de forma de segunda ordem são:

$$N_1 = L_1(2L_1 - 1); \quad N_2 = L_2(2L_2 - 1); \quad N_3 = L_3(2L_3 - 1) \quad (3.2)$$

$$N_4 = 4L_1L_2; \quad N_5 = 4L_2L_3; \quad N_6 = 4L_1L_3 \quad (3.3)$$

O mapeamento é feito a partir de funções de forma locais, sendo:

$$x(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^6 x_k N_k(\xi, \eta); \quad y(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^6 y_k N_k(\xi, \eta) \quad (3.4)$$

Assim, considerando f uma função de x e y e J a matriz jacobiana, as integrais no plano $x \times y$ podem ser transformadas para o plano $\xi \times \eta$:

$$\begin{aligned} \iint f(x, y) \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} dx dy \\ \rightarrow \int_0^1 \int_0^{1-\xi} f(\xi, \eta) \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial f}{\partial \eta} \right) |J| d\eta d\xi \end{aligned} \quad (3.5)$$

A integração numérica no triângulo elementar é feita a partir da quadratura de Gauss em n pontos:

$$\int_0^1 \int_0^{1-\xi} f(\xi, \eta) d\eta d\xi = \sum_{i=1}^n N_i f(\xi_i, \eta_i) \quad (3.6)$$

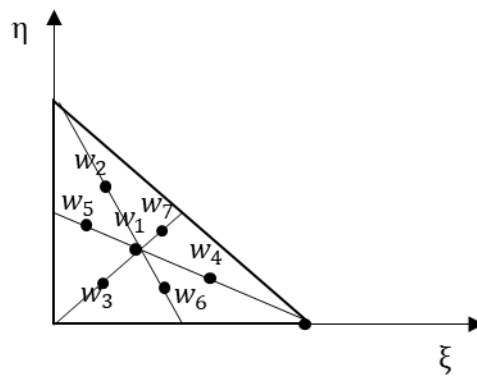
Onde N_i são os pesos conforme Tabela 3.1 e ξ_i e η_i são os valores das coordenadas de área, todos especificados para n pontos. Nesta dissertação a integração será feita por 7 pontos (Figura 3.2)

Tabela 3.1 – Pesos para 7 pontos da quadratura numérica no triângulo elementar

Ponto (i)	Peso (N_i)	ξ	η
1	0.225000000000	0.333333333333	0.333333333333
2	0.125939180544	0.797426985353	0.101286507323
3	0.125939180544	0.101286507323	0.797426985353
4	0.125939180544	0.101286507323	0.101286507323
5	0.132394152788	0.059715871789	0.470142064105
6	0.132394152788	0.470142064105	0.059715871789
7	0.132394152788	0.470142064105	0.470142064105

Fonte: Suzano (2017) p. 67

Figura 3.2 – Localização dos 7 pontos para integração no plano $\xi \times \eta$

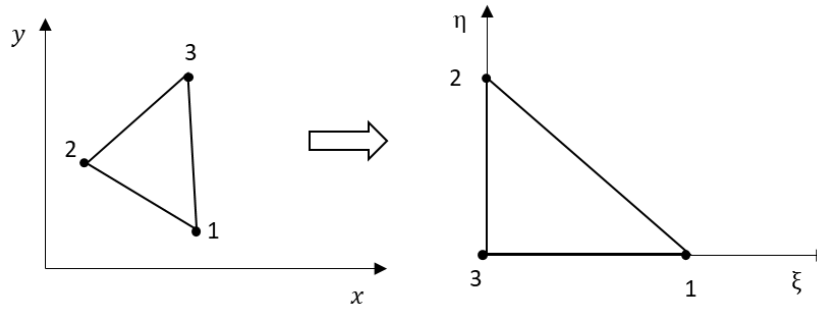


Fonte: Adaptado de Suzano (2017)

O elemento triangular linear representado na Figura 3.3 possui três nós e um grau de liberdade. As funções de forma locais são definidas pelas equação 3.7.

$$N_1 = \xi; \quad N_2 = \eta; \quad N_3 = 1 - \xi - \eta \quad (3.7)$$

Figura 3.3 – Elemento triangular linear



Fonte: Autora

Assim, o mapeamento por funções de forma para x é dado (o mesmo se aplica a y):

$$x = x_1 N_1 + x_2 N_2 + x_3 N_3 \quad (3.8)$$

$$x(\xi, \eta) = \xi (x_1 - x_3) + \eta (x_2 - x_3) + x_3 \quad (3.9)$$

A partir das derivadas de x e y em relação a ξ e η , é possível encontrar a matriz jacobiana e seu determinante, definidos a seguir (equação 3.10):

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}; \quad |J| = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (3.10)$$

Assim, por exemplo, a matriz elementar K definida na equação 4.16, que será utilizada na resolução das equações diferenciais parciais (ver origem da matriz K nas seções seguintes), pode ser reescrita em coordenadas locais pela equação 3.11.

$$K_{ij} = \int_A \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy \quad (3.11)$$

$$K_{ij} = \left\{ \int_A \left(J_{22} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \left(J_{22} \frac{\partial N_j}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right) + \left(J_{11} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} - J_{21} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right) \left(J_{11} \frac{\partial N_j}{\partial \eta} - J_{21} \frac{\partial N_j}{\partial \xi} \right) \right\} \frac{|J| d\xi d\eta}{|J|^2} \quad (3.12)$$

A matriz elementar para o elemento triangular quadrática segue a metodologia para o elemento linear.

3.2.2 Equações e Método de Garlekin para a Transferência de Calor

A transferência de calor em um material é definida pela equação 3.13.

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3.13)$$

Onde:

- ρ_c : massa específica do concreto (kg/m³)
- c_c : calor específico do concreto (J/kg.K)
- λ : condutividade térmica (W/m.K)
- T : temperatura no concreto na coordenada x e y (K)

Utilizando o método de Garlekin na equação 3.13, tem-se:

$$\rho_c c_c \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w_i T d\Omega - \lambda \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) d\Omega = 0 \quad (3.14)$$

Onde:

- w_i : função de ponderação do método
- Ω : representa o domínio do problema

As derivadas parciais da equação 3.14 podem ser substituídas por derivadas de primeira ordem pela regra da derivada do produto e pelo Teorema de Green, obtendo:

$$\begin{aligned} \rho_c c_c \int_{\Omega} w_i \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega + \lambda \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w_i}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) d\Omega \\ - \lambda \int_{\Gamma} w_i \frac{\partial T}{\partial \eta} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Onde Γ representa o contorno do problema

A condição de contorno para a resolução do problema é dada pelo fluxo de calor na superfície do concreto. Assim a integral no contorno é definida por:

$$\lambda \int_{\Gamma} w_i \frac{\partial T}{\partial \eta} d\Gamma = \oint_{\Gamma} w_i B_T (T_{env} - T) d\Gamma \quad (3.16)$$

Onde:

- B_T : coeficiente de transferência de calor na superfície (W/(m²°C))
- T_{env} : temperatura do ambiente no entorno (K)

A temperatura ambiente é definida pela equação 3.17, sendo uma senóide que varia anualmente em função do dia do ano.

$$T_{env} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \text{sen} \left[\frac{t}{365} 2\pi + \left(0,5 - \frac{2dia_{Tmax}}{365} \right) \right] \quad (3.17)$$

Onde:

- T_{min} : temperatura mínima (K)
- T_{max} : temperatura máxima (K)
- dia_{Tmax} : dia em que ocorre a temperatura máxima

Substituindo a equação 3.16 na equação 3.15, tem-se:

$$\begin{aligned} \rho_c c_c \int_{\Omega} w_i \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \lambda \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w_i}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) d\Omega \\ + \lambda \oint_{\Gamma} w_i B_T d\Gamma = \oint_{\Gamma} w_i B_T T_{env} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Sabendo que pelo método de Garlekin, as funções de ponderação são as funções de base definidas em cada nó ($w_i = N_i$) e discretizando o domínio por:

$$T = \sum_{j=1}^n T_j N_j \quad (3.19)$$

Então:

$$\begin{aligned}
& \rho_c c_c \sum_{j=1}^n \frac{\partial T_j}{\partial t} \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega + \lambda \sum_{j=1}^n T_j \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \\
& + B_T \sum_{j=1}^n T_j \oint_{\Gamma} N_i N_j d\Gamma = B_T \oint_{\Gamma} T_{env} N_i
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Na forma matricial:

$$\rho_c c_c [MT] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + \lambda [KT] \{T\} + B_T [ST] \{T\} = B_T T_{env} \{FT\} \tag{3.21}$$

Sendo:

$$[MT] = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega ; \quad [KT] = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \tag{3.22}$$

$$[ST] = \int_{\Gamma} N_i N_j d\Gamma ; \quad \{FT\} = \int_{\Gamma} N_i d \tag{3.23}$$

Reescrevendo a equação 3.21, em uma forma simplificada:

$$[MT^*] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [KT^*] \{T\} = B_T T_{env} \{FT\} \tag{3.24}$$

Sendo:

$$[MT^*] = \rho_c c_c \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \tag{3.25}$$

$$[KT^*] = \lambda [KT] + B_T [ST] \tag{3.26}$$

A equação 4.26 representa um sistema diferencial de primeira ordem no domínio do tempo. Para se obter a solução numérica, a integração no tempo é realizada por meio das diferenças finitas. O vetor em função do tempo pode ser escrito como:

$$\frac{\partial \{T\}}{\partial t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \tag{3.27}$$

O vetor pode ser aproximado por:

$$\{T\} \cong \{T\}^{t+\Delta t/2} \cong \theta\{T\}^{t+\Delta t} + (1-\theta)\{T\}^t \quad (3.28)$$

Onde:

- θ : parâmetro que varia de 0 a 1
- Δt : incremento de tempo (*time step*)

Reescrevendo a equação 4.29, tem-se:

$$\begin{aligned} [MT] \left(\frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \right) + \theta[KH]\{T\}^{t+\Delta t} + (1-\theta)[KT]\{T\}^t \\ = B_T T_{env} \{FT\} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Por fim, a solução numérica é dada pela equação 3.30.

$$\begin{aligned} ([MT^*] + \theta\Delta t[KT^*])\{T\}^{t+\Delta t} \\ = ((\theta-1)\Delta t[KT^*] + [MT^*])\{T\}^t + B_T T_{env} \Delta t \{FT\} \end{aligned} \quad (3.30)$$

3.2.3 Método de Garlekin para o Fluxo de Umidade

O fluxo de umidade é definido pela equação 3.31 (MARTÍN-PEREZ, 1999):

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.31)$$

Onde:

- D_h : coeficiente de difusão de umidade (m^2/s)
- h : umidade relativa dos poros do concreto
- w_e : quantidade de água evaporável (m^3 de água/ m^3 de concreto)
- $\frac{\partial w_e}{\partial h}$: capacidade de umidade do concreto
- $\frac{\partial h_c}{\partial t} = \alpha_2 \cdot v$, que considera a água liberada pelo processo de carbonatação, e v é o grau de carbonatação que será definido na seção 4.2.5.

O coeficiente de difusão de umidade (D_h) é calculado pelas equações 4.32 a 4.37.

$$D_h = D_{h,ref} \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \cdot F_3(h) \cdot f_{g4}(CaCO_3) \quad (3.32)$$

$$F_1(T) = \exp \left(\frac{U_m}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (3.33)$$

$$F_2(t_e) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}} \quad (3.34)$$

$$F_3(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^n} \quad (3.35)$$

$$f_{g4}(CaCO_3) = 1 - \zeta \frac{CaCO_3}{(CaCO_3)_{max}} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} = \frac{CkV_m + w_e h [1 + (C-1)kh] - w_e h (1 - kh)(C-1)}{(1 - kh)[1 + (C-1)kh]} \quad (3.37)$$

Onde:

- U_m : energia de ativação do processo de difusão de umidade (kJ/mol)
- R : constate do gás ($8,314 \times 10^{-3}$ kJ/mol)
- T_{ref} : temperatura de referência que o coeficiente de difusão $D_{h,ref}$ foi avaliado
- T : temperatura do concreto (K)
- t_e : representa o período de hidratação (s)

Para se calcular o fluxo de umidade, é necessário determinar a capacidade de umidade do concreto $\frac{\partial w_e}{\partial h}$. A distribuição de umidade em termos de umidade relativa dos poros apenas se refere ao estado termodinâmico da água nos poros, mas não fornece a quantidade de água livre (w_e) presente no sistema capilar. Para uma temperatura constante, a quantidade de água livre pode ser relacionada com a umidade relativa através de isothermas (BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011). De acordo com a isoterma de Brunauer-Skalny-Bolder, (modelo de BSB), estimada como:

$$w_e = \frac{C k V_m h}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]} \quad (3.38)$$

Onde os parâmetros C , k , V_m são avaliados através das seguintes expressões (equacoes 3.39 a 3.42) :

$$C = \exp\left(\frac{855}{T}\right) \quad (3.39)$$

$$k = \frac{\left(1 - \frac{1}{n}\right)C - 1}{C - 1}; \quad 0 < k < 1 \quad (3.40)$$

$$n = \begin{cases} \left(2,5 + \frac{15}{t_e}\right) (0,33 + 2,2 a/c); & t_e > 5 \text{ dias}; 0,3 < a/c < 0,6 \\ 5,5(0,33 + 2,2 a/c); & t_e \leq 5 \text{ dias} \\ 0,99 \left(2,5 + \frac{15}{t_e}\right); & t_e > 5 \text{ dias}; a/c \leq 0,3 \\ 1,65 \left(2,5 + \frac{15}{t_e}\right); & t_e > 5 \text{ dias}; a/c \geq 0,6 \end{cases} \quad (3.41)$$

$$V_m = \begin{cases} \left(0,068 - \frac{0,22}{t_e}\right) (0,85 + 0,45 a/c) \\ 0,024 (0,85 + 0,45 a/c) \\ 0,985 \left(0,068 - \frac{0,22}{t_e}\right) \\ 1,12 \left(0,068 - \frac{0,22}{t_e}\right) \end{cases} \quad (3.42)$$

Onde:

- T : temperatura no concreto (K)
- t_e : idade equivalente de hidratação (dias)
- a/c : relação água-cimento do concreto

A capacidade de umidade é obtida pelo ângulo da isoterma de equilíbrio e é dada por:

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} = \frac{CkV_m + w_e h [1 + (C - 1)kh] - w_e h (1 - kh)(C - 1)}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]} \quad (3.43)$$

A equação do fluxo de umidade no concreto (equação 4.31) se assemelha a equação da transferência de calor (equação 4.13). Seguindo a metodologia aplicada na seção 4.2.3 para a equação diferencial do fluxo de umidade, com o método de Garlekin, e a condição e contorno do fluxo de umidade dada pela equação 3.44. A umidade ambiente é definida pela equação 3.45, sendo uma senóide que varia anualmente em função do dia do ano.

$$\lambda \int_{\Gamma} w_i \frac{\partial T}{\partial \eta} d\Gamma = \oint_{\Gamma} w_i B_h (h_{env} - h^s) d\Gamma \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned}
h_{env} = & \frac{h_{min} + h_{max}}{2} \\
& + \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \operatorname{sen} \left[\frac{t}{365} 2\pi \right. \\
& \left. + \left(0,5 - \frac{2dia_{hmax}}{365} \right) \pi \right]
\end{aligned} \tag{3.45}$$

Onde:

- h_{env} : umidade relativa do ambiente no entorno
- h_{min} : humidade mínima
- h_{max} : humidade máxima
- dia_{hmax} : dia em que ocorre a máxima umidade
- B_h : coeficiente de transferência de umidade na superfície (m^2/s)
- h^s : umidade relativa dos poros do concreto na superfície

A equação 3.31 pode ser escrita na sua forma matricial como segue:

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} [MH] \frac{\partial \{h\}}{\partial x} + [KH] \{h\} + B_h [SH] \{h\} = B_h h_{env} \{FH\} \tag{3.46}$$

Sendo:

$$[MH] = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \tag{3.47}$$

$$[KH] = \int_{\Omega} D_{h,car} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \tag{3.48}$$

$$[SH] = \int_{\Gamma} N_i N_j d\Gamma; \quad \{FH\} = \int_{\Gamma} N_i d\Gamma \tag{3.49}$$

Reescrevendo a equação 3.51, em uma forma simplificada:

$$[MH^*] \frac{\partial \{h\}}{\partial t} + [KH^*] \{h\} = B_h h_{env} \{FH\} \tag{3.50}$$

Sendo:

$$[MH^*] = \frac{\partial w_e}{\partial h} \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega; \quad [KH^*] = [KH] + B_h [SH] \tag{3.51}$$

Utilizando o método das diferenças finitas para obter uma solução numérica (equacao 3.52):

$$\begin{aligned}
& ([MH^*] + \theta \Delta t [KH^*]) \{h\}^{t+\Delta t} \\
& = ((\theta - 1) \Delta t [KH^*] + [MH]) \{h\}^t + B_h h_{env} \Delta t \{FH\}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

3.2.4 Método de Garlekin para transporte de cloretos

O transporte de cloretos no tempo é dado por (MARTÍN-PÉREZ, 1999):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{3.53}$$

Onde:

- C_{fc} : concentração de cloretos livres (kg/m³ de concreto)
- h : umidade relativa dos poros do concreto
- D_c^* : coeficiente de difusão de cloretos aparente (m²/s)
- D_h^* : coeficiente de difusão de umidade aparente (m²/s)
- w_e : quantidade de água evaporável (m³ de água/m³ de concreto)

Os coeficientes de difusão de cloretos e umidade podem ser calculados pelas equações 3.54 e 3.55.

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \cdot \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \tag{3.54}$$

$$D_h^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \cdot \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \tag{3.55}$$

Onde:

- w_e : quantidade de água evaporável (m³ de água/m³ de concreto)
- $\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}$: é a capacidade de combinação do concreto (m³ da solução dos poros / m³ de concreto)
- D_c : coeficiente de difusão de cloretos (m²/s)
- D_h : coeficiente de difusão de umidade (m²/s)

As equações 3.56 a 3.59 descrevem os demais fatores para o cálculo dos coeficientes de difusão de cloretos e umidade.

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \quad (3.56)$$

$$f_1(T) = \exp\left(\frac{Uc}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (3.57)$$

$$f_2(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (3.58)$$

$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4}\right]^{-1} \quad (3.59)$$

Onde:

- $D_{c,ref}$: coeficiente de difusão de referência (m^2/s)
- Uc : energia de ativação do processo de difusão de cloretos (kJ/mol)
- R : constante do gás ($kJ/K.mol$)
- T_{ref} : Temperatura de referência onde o cloreto de difusão de referência foi calculado (K)
- T : temperatura do concreto (K)
- t_{ref} : tempo de exposição que o cloreto de difusão de referência foi medido (s)
- t : atual tempo de exposição (s)
- m : fator de redução da idade para a difusão cloretos
- h_c : humidade que D_c decai metade entre os valores máximos e mínimos (0,75)

Aplicando a identidade vetorial no termo convectivo da equação 4.53, pode-se obter:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \\ - \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} - C_{fc} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) - C_{fc} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$= 0$$

Da seção anterior, tem-se que:

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (3.61)$$

Substituindo a equação 3.61 em 3.60 e empregando o método do resíduo ponderado, tem-se:

$$\int w_i \left[\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} - C_{fc} \frac{\partial w_e}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (3.62)$$

Aplicando a regra da derivada do produto e o Teorema de Green, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\Omega} w_i C_{fc} d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) d\Omega \\ - \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) d\Omega \\ - \int_{\Omega} w_i C_{fc} \frac{\partial w_e}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega - \int_{\Gamma} w_i D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial n} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (3.63)$$

A condição de contorno para o transporte de íons cloretos pode ser definida pelo fluxo normal a superfície do concreto:

$$\int_{\Gamma} w_i D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma} w_i [B_c(C_{fc}^s - C_{env}) + B_h(h^s - h_{env})] d\Gamma \quad (3.64)$$

Onde:

- C_{env} : concentração de cloretos no ambiente (% massa de cimento)
- C_{fc}^s : concentração de cloretos livres na superfície no concreto
- B_c : coeficiente de transferência de cloretos na superfície do concreto (m²/s)
- h_{env} : umidade relativa do ambiente
- h^s : é a umidade relativa dos na superfície do concreto
- B_h : coeficiente de transferência de umidade na superfície do concreto (m²/s)

Substituindo a equação 3.64, considerando o método de Garlekin ($w_i = N_i$) e discretizando o domínio, através de:

$$C_{fc} = \sum_{j=1}^n C_{fc} N_j \quad e \quad h = \sum_{j=1}^n h N_j \quad (3.65)$$

Então:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^n \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega + \sum_{j=1}^n C_{fc} \int_{\Omega} D_c^* \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \\
& - \sum_{j=1}^n C_{fc} \int_{\Omega} D_h^* N_i \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} h \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_j}{\partial y} h \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \\
& - \sum_{j=1}^n C_{fc} \int_{\Omega} N_i N_j \frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} N_j d\Omega \\
& + \sum_{j=1}^n C_{fc} \int_{\Gamma} B_c N_i N_j d\Gamma \\
& = \int_{\Gamma} N_i C_{env} [B_c + B_h (h_{env} - h^s)] d\Gamma
\end{aligned} \tag{3.66}$$

Na forma matricial:

$$\begin{aligned}
& [MC] \frac{\partial \{C_{fc}\}}{\partial x} + [KC] \{C_{fc}\} - [GC] \{C_{fc}\} - [RC] \{C_{fc}\} \\
& + B_c [SC] \{C_{fc}\} = (B_c + B_h (h_{env} - h^s)) \Delta t \{FC\}
\end{aligned} \tag{3.67}$$

Sendo:

$$[MC] = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \tag{3.68}$$

$$[KC] = \int_{\Omega} D_c^* \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \tag{3.69}$$

$$[GC] = \int_{\Omega} D_h^* N_i \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} h \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_j}{\partial y} h \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \tag{3.70}$$

$$[RC] = \int_{\Omega} N_i N_j \frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} N_j d\Omega \tag{3.71}$$

$$\begin{aligned}
[SC] &= \int_{\Gamma} N_i N_j d\Gamma; \quad \{FC\} \\
&= \int_{\Gamma} N_i C_{env} [B_c + B_h (h_{env} - h^s)] d\Gamma
\end{aligned} \tag{3.72}$$

Reescrevendo a equação 4.94, em uma forma simplificada:

$$[MC] \frac{\partial \{C_{fc}\}}{\partial t} + [KC^*] \{C_{fc}\} = (B_c + B_h (h_{env} - h)) \{FC\} \tag{3.73}$$

Sendo:

$$[KC^*] = [KC] - [GC] - [RC] + B_c [SC] \tag{3.74}$$

Utilizando o método das diferenças finitas para obter uma solução numérica da equação 4.75.

$$\begin{aligned}
&([MC] + \theta \Delta t [KC^*]) \{C_{fc}\}^{t+\Delta t} \\
&= ((\theta - 1) \Delta t [KC^*] + [MC]) \{C_{fc}\}^t \\
&+ (B_c + B_h (h_{env} - h)) \Delta t \{FC\}
\end{aligned} \tag{3.75}$$

A tabela 3.2 resume as equações descritas nas seções seguintes.

Tabela 3.2 - Resumo das formulações utilizadas

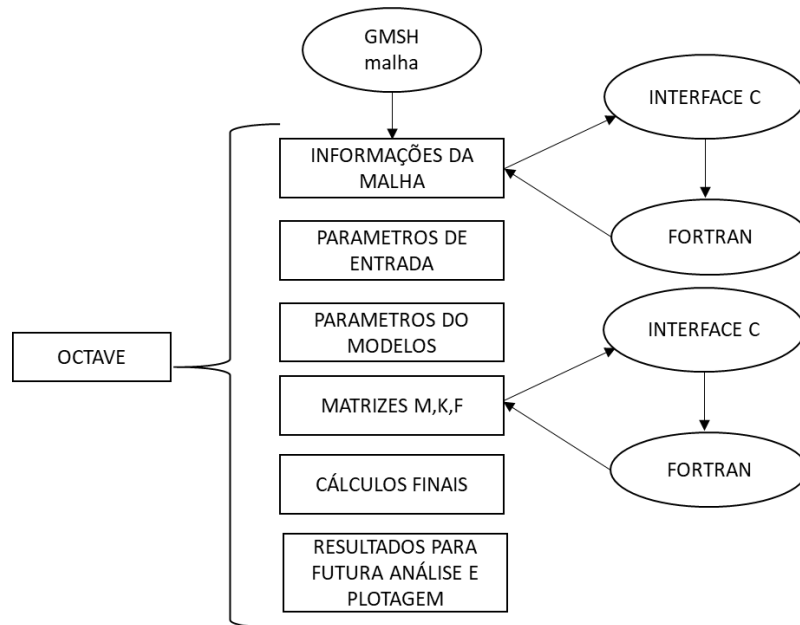
	Formulações		Equação
Transferência de calor	Equação Principal	$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y} = 0$	3.13
	Forma Matricial	$[MT^*] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [KT^*] \{T\} = B_T T_{env} \{FT\}$	3.24
	Solução Numérica	$ \begin{aligned} &([MT^*] + \theta \Delta t [KT^*]) \{T\}^{t+\Delta t} \\ &= ((\theta - 1) \Delta t [KT^*] + [MT^*]) \{T\}^t \\ &+ B_T T_{env} \Delta t \{FT\} \end{aligned} $	3.30
Fluxo de umidade	Equação Principal	$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0$	3.31

Transporte de cloretos	Forma Matricial	$[MH^*] \frac{\partial \{h\}}{\partial t} + [KH^*]\{h\} = B_h h_{env} \{FH\}$	3.50
	Solução Numérica	$([MH^*] + \theta \Delta t [KH^*])\{h\}^{t+\Delta t} = ((\theta - 1)\Delta t [KH^*] + [MH])\{h\}^t + B_h h_{env} \Delta t \{FH\}$	3.52
	Equacao Principal	$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right)$	3.53
	Forma Matricial	$[MC] \frac{\partial \{C_{fc}\}}{\partial t} + [KC^*]\{C_{fc}\} = (B_c + B_h(h_{env} - h))\{FC\}$	3.73
	Solução Numérica	$([MC] + \theta \Delta t [KC^*])\{C_{fc}\}^{t+\Delta t} = ((\theta - 1)\Delta t [KC^*] + [C])\{C_{fc}\}^t + (B_c + B_h(h_{env} - h))\Delta t \{FC\}$	3.75

3.3 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO

O programa foi desenvolvido utilizando o *software* livre GNU Octave (<https://www.gnu.org/software/octave/>), no sistema operacional Windows. Os cálculos com matrizes foram realizados em Fortran, para permitir uma maior velocidade na execução (SUZANO, 2017). Para interligar as duas programações, foi utilizado uma interface com o programa em linguagem C. Para a geração da malha da estrutura bidimensional, o *software* livre GMSH (<http://gmsh.info/>) é utilizado. O programa gera um arquivo *.msh* com as informações de todos os nós, suas coordenadas, elementos e características. A partir disso, a malha é inserida no Octave. A Figura 3.4 demonstra as etapas realizadas pelo modelo para sua resolução do problema.

Figura 3.4 – Representação do desenvolvimento do modelo



Fonte: Adaptado de Suzano (2017)

3.3.1 Considerações sobre o modelo

Durante a implementação do modelo, alguns problemas de instabilidade foram detectados em relação ao passo de tempo escolhido (do inglês: *time step*). No modelo desenvolvido por Martín-Perez (1999), o efeito da não linearidade apresentou problemas de convergência. Assim, a autora para resolver esse problema avaliou os coeficientes de difusão de umidade e cloretos de forma linear a partir dos valores obtidos no passo de tempo anterior. Por questões de simplicidade o mesmo procedimento será considerado nesse modelo, apesar de outros autores considerarem o procedimento não linear (BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011). Para minimizar os erros, o passo de tempo deve ser cuidadosamente escolhido para cada simulação. Com o uso de três equações diferenciais (transferência de calor, fluxo de umidade e transporte de cloretos) que possuem coeficientes de difusão diferentes e variantes no tempo, foi necessária uma ampla verificação do passo de tempo. Martín-Perez (1999) obteve bons resultados com o passo de tempo de 1 dia a 12 horas.

No entanto, ao se utilizar o mesmo passo de tempo para todas as equações diferenciais, problemas de convergência surgiam para alguma das equações, parando a programação. Por exemplo para o uso do coeficiente de umidade (Dh) menores que $4e-11 \text{ m}^2/\text{s}$ (O valor de $Dh = 3e-10$ é comumente utilizado por autores de modelos numéricos), a difusão de umidade se torna muito baixa acarretando problemas de convergência, para o passo de tempo de 12 horas ou 1 dia, por exemplo. Para resolver esse problema, optou-se pela escolha de diferentes passos de tempo para cada equação diferencial. É importante salientar aqui que essa informação não é descrita pela maioria dos autores dos modelos numéricos, o que dificulta uma comparação com outros modelos.

Com a intenção de aumentar o passo de tempo para o cálculo das outras equações diferenciais, o cálculo da temperatura é realizado anteriormente para todo o tempo definido nos parâmetros de entrada. O passo de tempo de temperatura foi definido para 3600s. A seguir, os resultados são armazenados e servirão como parâmetros de entrada para as equações de umidade e cloretos. Os passos de tempo dos mecanismos são definidos para cada simulação. Assim, os cálculos de fluxo de umidade e cloretos foram realizados juntos e o passo de tempo é adotado para cada simulação, dependendo da estabilidade adquirida no modelo.

Além disso, outros problemas de convergência são observados quando utilizado as condições de contorno de Neumann, descritos no capítulo anterior. Suzano (2017) também apresentou problemas de convergência, principalmente quando utilizou as condições de contorno de Neumann. Dessa forma a autora, por questões de simplicidade optou pela condição de contorno Dirichlet, que considera a condição de contorno igual a um número fixo, em vez de considerar a diferença entre ambiente e material. Martin-Perez (1999) reportou esse problema para seu modelo e selecionou o coeficiente de transferência de cloretos (Bc) igual a $1e-5 \text{ m}^2/\text{s}$, no entanto outros autores (BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011; ZHU et al., 2016) utilizam igual a $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Essa grande variação de valores também é observada para o coeficiente de transferência de umidade (Bh), variando de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ até $3e-7 \text{ m}^2/\text{s}$ (SAETTA, SCOTTA E VITALINI, 1993). Para o modelo desenvolvido nessa dissertação, os problemas de convergência foram resolvidos ao utilizar o valor de $3e-7 \text{ m}^2/\text{s}$ para o coeficiente de transferência de umidade. No entanto, se outras aplicações forem utilizadas, é possível que haja necessidade de um novo estudo desse coeficiente.

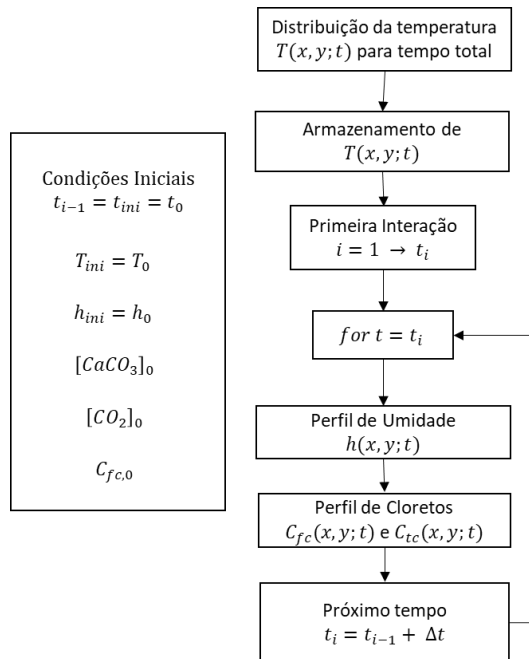
3.3.2 Fluxograma do modelo

O algoritmo de resolução do modelo procede da seguinte forma:

1. Os parâmetros de entrada são definidos: geometria da estrutura, propriedades do material, valor da concentração limite de cloretos, tempo total, condições iniciais e de contorno.
2. Cálculo da distribuição de temperatura $T(x, y)$ para todo o tempo definido
3. Armazenamento da temperatura no espaço de tempo (Δt) escolhido para o cálculo da umidade, carbonatação e cloretos.
4. Cálculo do perfil de umidade $h(x, y)$ dos poros de concreto. O valor de w_e é obtido pela isoterma de adsorção.
5. Solução da concentração de cloretos nos poros do concreto $C_{fc}(x, y)$. A concentração total $C_{tc}(x, y)$ é determinada pelas relações lineares da capacidade de combinação de cloretos
6. Se a concentração crítica de cloretos for atingida nas armaduras do concreto, assume-se que a corrosão iniciou. Caso contrário, o próximo espaço de tempo é realizado e o número 4 é repetido.

A Figura 3.5 representa em fluxograma o procedimento descrito anteriormente para cálculo da concentração de cloretos através do modelo numérico desenvolvido nessa dissertação.

Figura 3.5 – Fluxograma para cálculo da temperatura, umidade e cloretos



Fonte: Autora

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DO MODELO

4 APLICAÇÃO DO MODELO – SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

O modelo desenvolvido nesse trabalho, descrito no capítulo 4 com sua implementação numérica, foi examinado em comparação com outros modelos e aplicado em diferentes situações para analisar sua confiabilidade. Além disso, seu uso para a previsão de vida útil para estruturas reais foi demonstrado.

4.2 RESULTADOS COM SOLUÇÕES ANALÍTICAS

Para analisar a confiabilidade do modelo de cloretos desenvolvido, optou-se por fazer a verificação dos resultados numéricos com resultados obtidos da solução analítica (equação 4.1) e com a solução analítica que considera a convecção de forma simplificada (equação 4.2).

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (4.1)$$

$$C(x, t) = \frac{C_s}{2} \cdot \left[\exp \left(\frac{v}{D_c} x \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} + v \frac{\sqrt{D_c t}}{2u} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} - v \frac{\sqrt{D_c t}}{2D_c} \right) \right] \quad (4.2)$$

Onde:

- $C(x, t)$: é a concentração de cloretos (kg/m³) no tempo t (s) e distância x (m)
- C_s : concentração superficial de cloreto
- D_c : coeficiente de difusão de cloretos (m²/s)
- v : velocidade de convecção (m²/s)

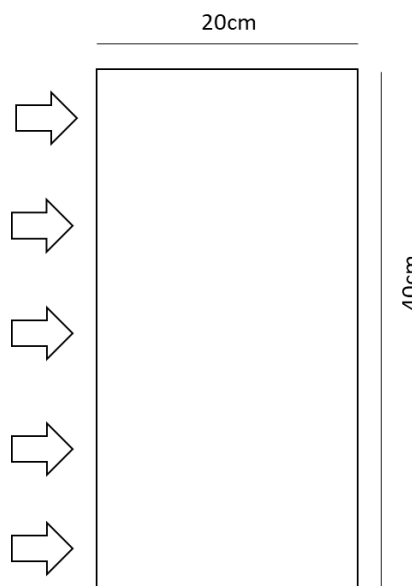
As equações 4.1 e 4.2 foram apresentadas na seção 2.4 como soluções da 2ª Lei de Fick e suas limitações foram identificadas naquela seção. Apesar de ainda ser comum utilizar a equação 4.1 para obter resultados da penetração de cloretos, essa solução não é válida para prever a concentração de cloretos para exposições de longa duração nem por ajustes de curva (em inglês: *curve-fitting*) em dados experimentais, devido principalmente a não consideração do coeficiente de difusão variante no tempo (ANDRADE; CASTELLOTE; D'ANDREA, 2011; BASTIDAS-ARTEAGA et al., 2011; TANG et al., 2015). No entanto, os resultados da solução analítica servem como uma forma de verificar a resposta da solução numérica (se considerando as

limitações da solução analítica, o modelo numérico deverá obter o mesmo valor), como demonstrando nas teses de Martin-Perez (1999) e Tavares (2013) quando verificaram os resultados para seus modelos unidimensionais.

O modelo desta dissertação é um modelo bidimensional e a solução analítica considera a difusão de cloretos de forma unidimensional. A comparação de modelos unidimensionais e bidimensionais é desaconselhável (TAVARES, 2013), já que o modelo bidimensional considera a variação de concentração de cloretos tanto na direção x e na direção y , tornando o modelo mais capaz de descrever a realidade. Assim, essa comparação não tem finalidade de validar o modelo, mas é possível verificar se a resposta numérica descreve o comportamento da 2ª Lei de Fick no tempo com as condições de contorno da solução analítica. Dois fatores imprescindíveis nessa comparação para os modelos numéricos são: 1) verificar o tamanho dos elementos da malha; 2) as condições de contorno do modelo bidimensional, já que a solução analítica descreve o fluxo de forma unidimensional.

Nesse caso, apenas a difusão é considerada, já que a convecção não é considerada na solução analítica. Para verificar os resultados, a umidade e temperatura não variam com tempo (limitação da equação 4.1). Os resultados obtidos foram considerados para uma viga de concreto armado com 20 cm de largura e 40 cm de altura. Para realizar a comparação com a solução analítica, apenas a face esquerda é exposta às condições ambientais (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Geometria para simulação

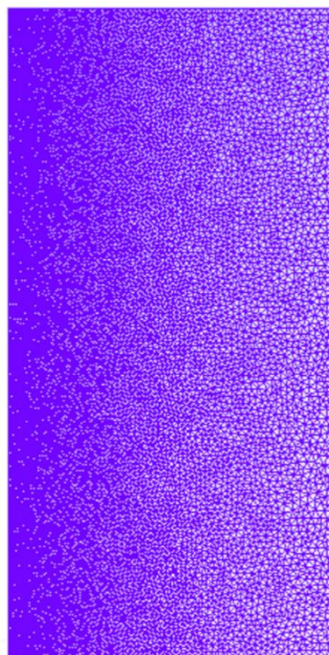


Fonte: Autora

Dessa forma, para se fazer essa comparação, algumas técnicas numéricas devem ser empregadas. Para isso, apenas uma face pode ser submetida a penetração de cloretos, a condição de contorno de Dirichlet foi imposta na face esquerda, sendo igual a concentração superficial do ambiente. As três faces restantes foram definidas por condição de contorno de Dirichlet com concentração superficial igual a zero, para evitar ingresso de cloretos nessas faces. Além disso, os resultados da solução numérica são retirados do meio da viga para mitigar a influência das bordas da geometria, no caso do modelo bidimensional.

A malha gerada para essa simulação pode ser verificada na Figura 4.2. Optou-se por uma malha não uniforme, já que os valores de concentração de cloretos são obtidos no cobrimento e não para a viga inteira. A malha apresenta 25868 elementos triangulares e 12935 nós. A face esquerda apresenta elementos triangulares com tamanho de 0.0017 m até a face direita com 0.005 m.

Figura 4.2 – Malha utilizada para a simulação



Fonte: Autora

Os parâmetros de entrada e os parâmetros para a simulação numérica podem ser verificados na Tabela 4.1. As simulações foram realizadas para o período de 1 ano, 10 anos e 30 anos.

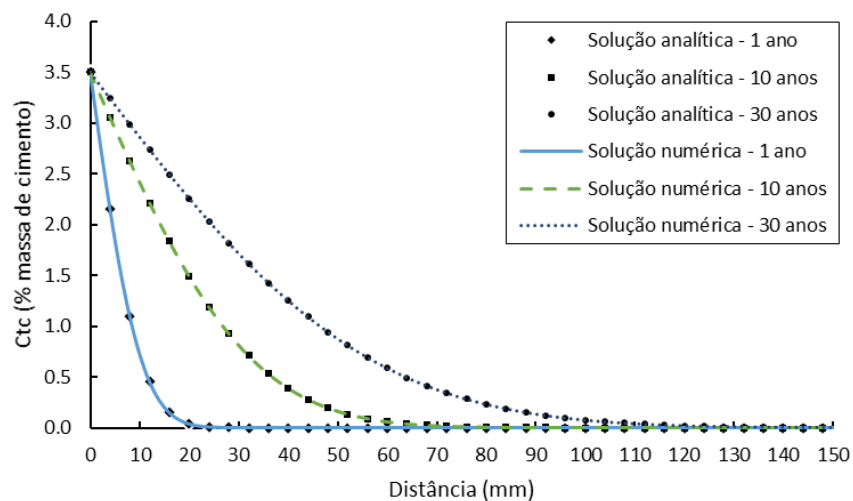
Tabela 4.1 – Parâmetros para a simulação

Parâmetro	Valor
Dc	1e-12 m ² /s
Cs	3.5 (% massa de cimento)
Tempo total	30 anos
Time step	5 dias

Fonte: Autora

Os resultados obtidos para o modelo numérico desenvolvido e a solução analítica podem ser verificados na Figura 4.3 para 1 ano, 10 e 30 anos.

Figura 4.3 – Resultados da solução analítica e resultados numéricos para difusão simples



Fonte: Autora

Como pode ser observado pelas Figura 4.3, a solução analítica e a solução numérica se sobrepõem. Pode-se considerar que o tamanho da malha e o espaço de tempo definidos satisfizeram a análise. Além disso, a condição de contorno foi adequada para o caso. Portanto, o modelo desenvolvido está coerente com o comportamento da difusão considerada pela solução analítica.

A partir dos resultados anteriores, o fenômeno transiente da difusão-convecção simplificada também foi verificado com a solução analítica (equação 4.2) com a malha utilizada da Figura 4.2 e passo de tempo de 5 dias. Nessa simulação, a umidade e temperatura não foram consideradas variante no tempo, já que a solução analítica não considera essa variação. Dessa forma, essa análise é chamada nessa dissertação de convecção simplificada. Os parâmetros de entrada para a simulação podem ser observados na Tabela 4.2. Dois valores de velocidade de

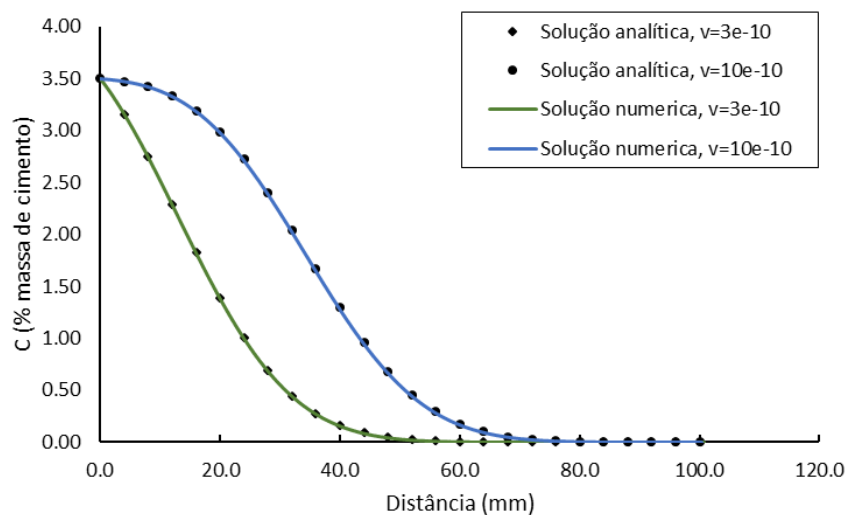
convecção (v) foram utilizados para se comparar os resultados e verificar o comportamento do modelo. A Figura 4.4 mostra os resultados da solução numérica e analítica após o tempo total de 1 ano para diferentes valores da velocidade de convecção.

Tabela 4.2 – Parâmetros para simulação do processo difusão-convecção simplificado

Parâmetro	Valor
C_s	3.5 (% massa de cimento)
D_c	$4e-12 \text{ m}^2/\text{s}$
v	$3e-10 \text{ m}^2/2$
v	$10e-10 \text{ m}^2/\text{s}$

Fonte: Autora

Figura 4.4 – Comparação entre a solução analítica e resultados numéricos para a convecção simplificada após 1 ano



Fonte: Autora

Por fim, o modelo numérico descreve o fenômeno transiente de difusão e difusão-convecção simplificada dentro das limitações das soluções analíticas.

4.3 SIMULAÇÕES COM OUTROS MODELOS NUMÉRICOS

A comparação entre modelos numéricos é raramente contemplada na literatura, seja pelo fato de que cada modelo numérico possui sua singularidade, mas também devido ao fato de que é difícil o acesso a programação de diferentes modelos numéricos. Andrade et al. (2013) compara

o modelo de Tavares (2013) com outros 8 modelos, sendo 3 modelos numéricos. Além de que essa comparação é feita entre modelos unidimensionais, os autores não deixam claro como é a formulação dos outros modelos numéricos. Os autores apenas evidenciam se o modelo numérico considera a dependência no tempo para o coeficiente de difusão e concentração superficial e se o modelo avalia a combinação de cloretos.

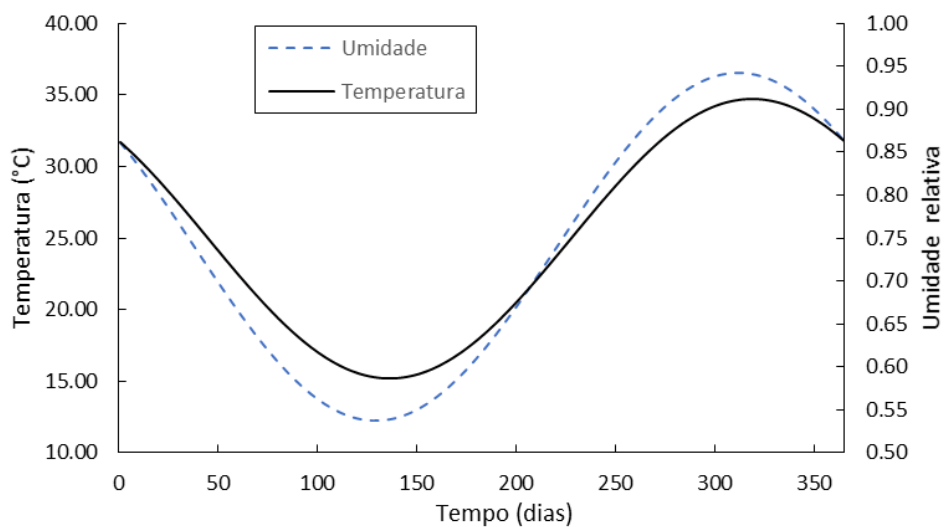
Dessa forma, essa seção visa comparar os resultados numéricos obtidos pelo modelo dessa dissertação com os modelos de Suzano (2017) e Dominicini (2016), ambos modelos bidimensionais. O modelo de Suzano (2017) considera a formulação de ingresso de cloretos de Lin, Liu e Xiang (2010) e equação da umidade de Saetta, Scotta, Vitaliani (1993), essas equações podem ser lembradas nas Tabelas 2.6 a 2.9 do capítulo 2. Já o modelo de Dominicini (2016) é baseado no modelo unidimensional de Tavares (2013), este considera a equação de difusão de Martin-Perez (1999), no entanto, o autor não considera o fenômeno da convecção no seu modelo. Além disso, por simplificação, Dominicini (2016) considera a variação da temperatura e umidade no concreto igual os valores de variação do ambiente. Assim, o autor não considera as equações diferenciais do fluxo de umidade e transferência de calor no concreto. O modelo de Dominicini (2016) é também um modelo bidimensional, por consequência a comparação é realizada de forma bidimensional para todos os modelos.

Os resultados das simulações realizadas em Suzano (2017) serão comparados com os resultados obtidos pelo modelo desta dissertação e o modelo de Dominicini (2016). A simulação consiste de uma viga em concreto armado de 20 cm de largura e 40 cm de altura (vide Figura 4.1). A viga foi considerada estando exposta às condições ambientais apenas pela face esquerda. A malha da Figura 4.2 da seção anterior foi utilizada por todos os modelos e o passo de tempo de 5 dias.

A viga foi considerada no ambiente da cidade de Vitória, Espírito Santo, Brasil em zona marinha em condições severas de exposição. Os dados climáticos da cidade foram retirados do BDMEP¹ (Bando de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa). A cidade de Vitória apresenta as variações de temperatura e umidade típicas de um clima tropical. Considerando a temperatura e umidade variantes por uma função senoidal como descrito no capítulo 3, equações 3.17 e 3.45, respectivamente, a Figura 4.5 mostra a variação da temperatura e umidade, respectivamente, utilizados para a simulação

¹ BMDMEP. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>

Figura 4.5 – Variação da temperatura e umidade ambiente



Fonte: Autora

Os parâmetros utilizados na simulação considerados por Suzano (2017) podem ser verificados na Tabela 4.3. A concentração inicial na viga foi mantida nula, não há contaminação dos materiais constituintes. A concentração superficial foi considerada constante e igual a 5% massa de cimento, sendo um ambiente de severa agressividade (GJORV, 2015; ZHANG; LOUNIS, 2006).

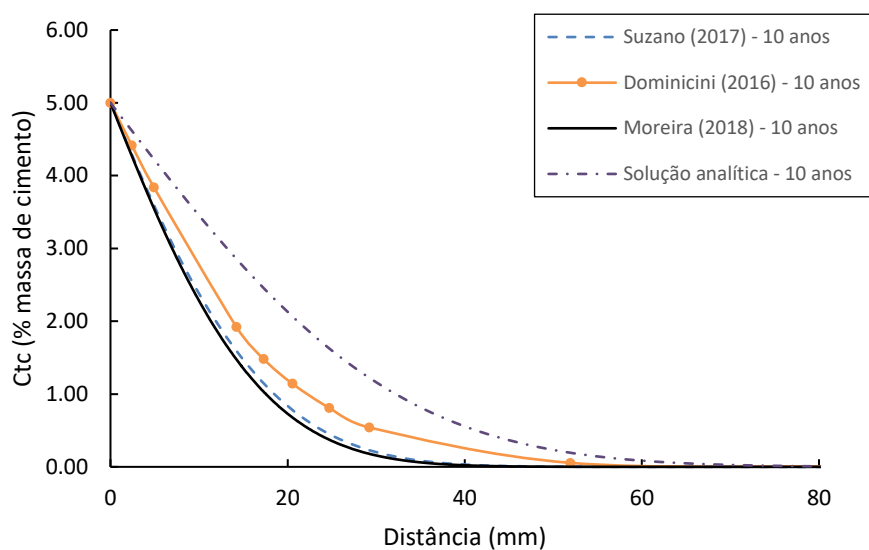
Tabela 4.3 – Parâmetros para a simulação entre modelos numéricos

Temperatura	Massa específica x Calor específico do concreto	$\rho_c c_c$	1,932e-6 J/m ³ K
	Condutividade térmica	λ	1,4 W/mK
	Coeficiente de transferência de calor na superfície	B_t	0,07 W/mK
	Temperatura inicial do concreto	T_0	23 C
	Temperatura máxima ambiente	T_{max}	34,7 C
	Temperatura mínima ambiente	T_{min}	15,2 C
	Dia de máxima anual	$d_{t,max}$	319
	Temperatura de referência	T_{ref}	23
Umidade	Umidade inicial do concreto	h_0	0,7
	Coeficiente de difusão de umidade de referência	$D_{h,ref}$	3e-10 m ² /s
	Parâmetro que representa a relação Dhmin/Dhmax	α_0	0,05
	Umidade com que Dh está entre seu max e min	h_c	0,75
	Parâmetro que caracteriza a variação do Dh no tempo	n	6
	Coeficiente de transferencia de umidade na superfície	B_h	3e-7 m/s
	Umidade máxima ambiente	h_{max}	0,9425
	Umidade mínima ambiente	h_{min}	0,5375
	Dia de máxima anual	$dia_{h,max}$	312
Cloretos	Concentração inicial de cloretos no concreto	C_0	0
	Coeficiente de difusão de referência	$D_{c,ref}$	
	Energia de ativação	U	44,6 kJ/mol 8,314e-3
	Constante dos gases	R	kJ/(Kmol)
	Fator de redução da idade	m	0.264
	Idade de referência	t_{ref}	120
	Coeficiente de transferência de cloretos	B_c	1 m/s
		C_s	5% massa de cimento
	Concentração superficial de cloretos		

Fonte: Suzano (2017) p. 84

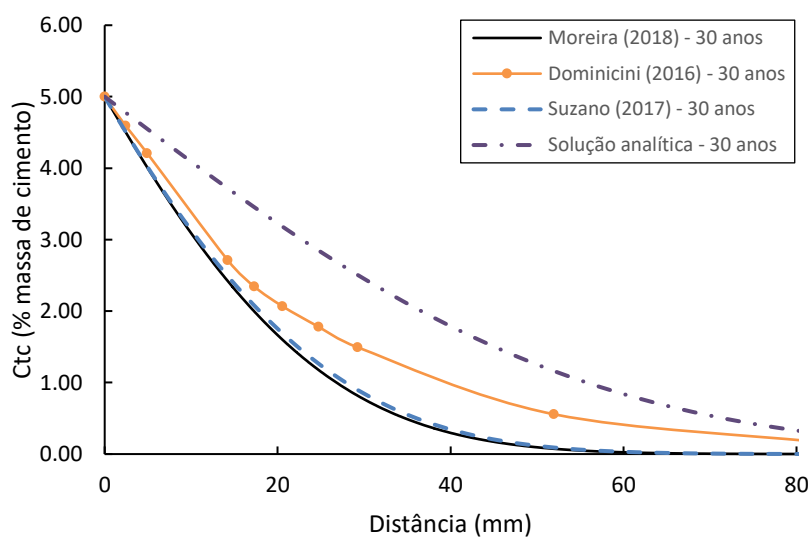
As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram a comparação dos resultados entre a solução analítica, o modelo de Dominicini (2016), o modelo de Suzano (2017) e o modelo desenvolvido neste trabalho para os períodos de 10, 30 e 50 anos e a solução analítica da difusão, respectivamente.

Figura 4.6 – Resultados de concentração de cloretos para 10 anos



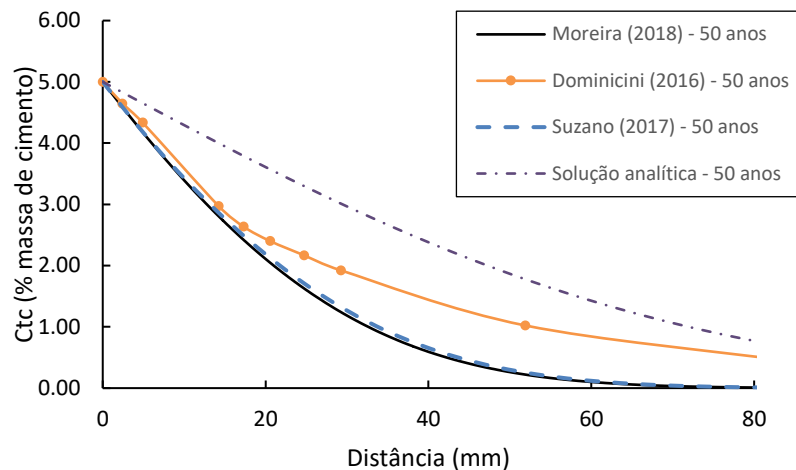
Fonte: Autora

Figura 4.7 – Resultados de concentração de cloretos para 30 anos



Fonte: Autora

Figura 4.8 – Resultados de concentração de cloretos para 50 anos



Fonte: Autora

Para os resultados das Figuras 4.6 a 4.8, o coeficiente de difusão depende da temperatura, da umidade e do tempo de exposição. Assim, para cada passo de tempo, o coeficiente de difusão de cada nó varia dependendo da temperatura e umidade daquele instante e naquele nó da malha dos métodos dos elementos finitos. Os resultados são de acordo com o destacado por vários autores (ANDRADE et al., 2013; TANG; UTGENANNT; BOUBITSAS, 2015) que a solução analítica supervaloriza a concentração de cloretos, isso é principalmente pelo fato que o coeficiente de difusão não varia em função da temperatura, umidade e do tempo de exposição.

Em contrapartida, o modelo de Dominicini (2016) considera a variação do coeficiente de difusão com a temperatura e umidade. No entanto, a temperatura e umidade são iguais a variação ambiental e constante para toda a seção, o autor não considera as equações diferenciais de umidade e temperatura, ou seja, a variação desses parâmetros dentro do concreto não é contemplada. Assim, os resultados do modelo desenvolvido nessa dissertação e os resultados do modelo de Dominicini (2016) se aproximam quanto estes são próximos a superfície da seção, aonde os valores de temperatura e umidade ambiente são próximos aos valores de temperatura e umidade do concreto. A medida que vai se distanciando da superfície, os resultados de Dominicini (2016) se distanciam dos resultados do modelo desenvolvido, já que os valores de temperatura e umidade do concreto são diferentes dos valores obtidos na superfície.

A diferença entre os modelos reside nesses fatores, onde os valores de temperatura e umidade são dados de entrada. Como já demonstrado por Suzano (2017), a não consideração do fluxo

de umidade e temperatura no concreto leva a resultados mais conservadores quanto a análise de previsão de vida útil.

Por fim, verifica-se que os resultados de Suzano (2017) e o modelo desta dissertação são próximos. Esse é um resultado interessante já que raramente é possível fazer comparações entre modelos numéricos mais complexos. Os dois modelos são muito similares se comparados apenas com o fenômeno da difusão. Estes apresentam o mesmo comportamento quanto a difusão, incluindo, a longo prazo (Figuras 4.6 a 4.8), confirmando a confiabilidade do modelo numérico. Na comparação entre modelos numéricos fica claro que cada possui sua particularidade. Destaca-se a importância de considerar o fluxo de umidade e transferência de calor para o cálculo das concentrações de cloretos, diminuindo a concentração de cloretos a longo prazo.

No entanto, cada modelo pode ser utilizado com cautela e seguindo suas limitações quanto a previsão da vida útil. Assim, todos os resultados devem ser analisados de forma racional e com uma avaliação criteriosa da engenharia, e não apenas utilizar os resultados matemáticos obtidos (ANDRADE et al., 2013).

4.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DIFUSÃO E CONVECÇÃO

Essa seção visa verificar a influência da convecção para os resultados de concentração de cloretos. Para esta aplicação, a concentração de cloretos no concreto foi calculada considerando dois tipos de situações: a) o transporte de cloretos apenas com o mecanismo da difusão; e b) o transporte de cloretos com os mecanismos da difusão e convecção. Nessa simulação, os coeficientes de difusão e umidade variam com o tempo e espaço, em função da temperatura, umidade e tempo de exposição. Além disso, nessa seção as equações diferenciais de umidade e temperatura foram consideradas acopladas ao transporte de cloretos.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 demonstram os resultados obtidos considerando apenas a difusão e a convecção-difusão para 1 ano e para 5 anos, respectivamente.

Figura 4.9 – Comparação entre os resultados de difusão e resultados de convecção-difusão após 1 ano

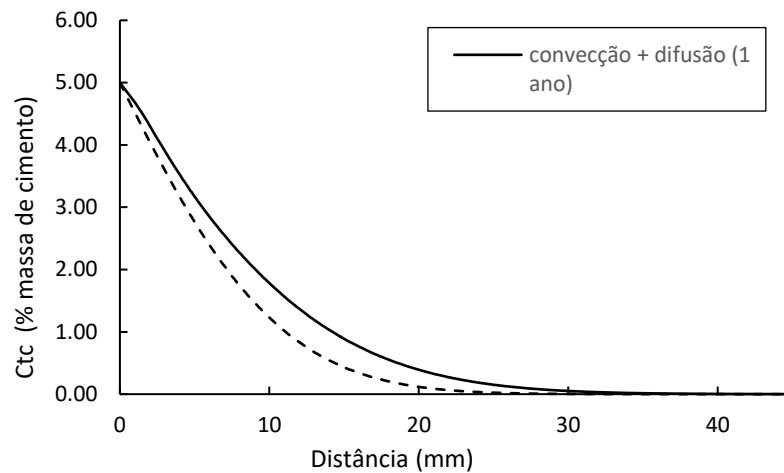
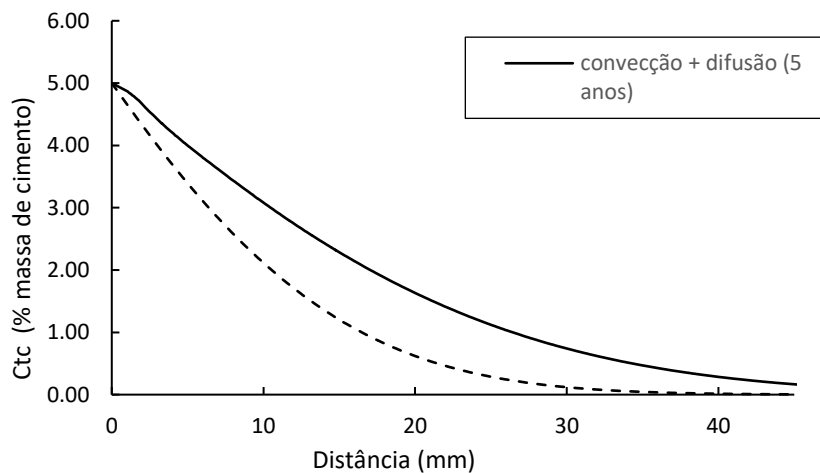


Figura 4.10 – Comparação entre os resultados de difusão e resultados de convecção-difusão após 5 anos



Pode-se observar que com a inclusão da convecção, a concentração de cloretos sofre um aumento significativo, que se acentua com o tempo, de 1 ano para 5 anos. Para qualquer profundidade fixa, a concentração de cloretos quando se considera a convecção é maior do que quando somente é considerado a difusão. Essa contribuição vem da umidade acoplada com o transporte de cloretos, que contribui para a entrada de cloretos dependendo da umidade do concreto e umidade ambiente. Esse efeito é especialmente importante para concretos parcialmente saturados, aonde a entrada de água ajuda no transporte de cloretos.

Analisando as curvas, é possível destacar que o perfil do transporte de cloretos com a convecção apresenta um decaimento menos acentuado do que o perfil apresentado pelo transporte de cloretos apenas com difusão. Essa diferença pode ser mais perceptível dependendo da variação de umidade do ambiente e das propriedades de fluxo de umidade do concreto. A partir desses resultados numéricos é possível afirmar, o que já vem sendo evidenciado pela literatura, a importância de considerar a convecção para a previsão de vida útil do concreto, dependendo do caso estudado.

4.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS

Essa seção visa o estudo do efeito de alguns parâmetros no cálculo da concentração de cloretos e como esses parâmetros podem influenciar na concentração com o tempo. As simulações dessa seção consideram a entrada de cloretos apenas pelo lado esquerda da seção (Figura 4.1) e elas são realizadas para a malha da Figura 4.2. Os fenômenos da convecção e difusão acoplados são considerados nas simulações. Os parâmetros invariáveis utilizados para as simulações realizadas são os mesmo descritos na Tabela 4.3, anteriormente apresentada. Os parâmetros que serão analisados quanto sua variação são: a) concentração superficial, b) combinação de cloretos e c) temperatura.

a) Concentração Superficial

A primeira análise realizada diz respeito a variação da concentração superficial (C_s). Nesse caso, os efeitos da temperatura na concentração de cloretos não foram considerados para facilitar a interpretação dos resultados e a simulação numérica. A temperatura foi considerada constante e igual a 23°C.

Os valores de concentração superficial utilizados foram retirados do estudo de Zhang e Lounis (2006) representando a média dos valores para cada exposição do ambiente. A Tabela 4.4 descreve os valores de concentração superficial utilizados e a sua respectiva exposição ambiente.

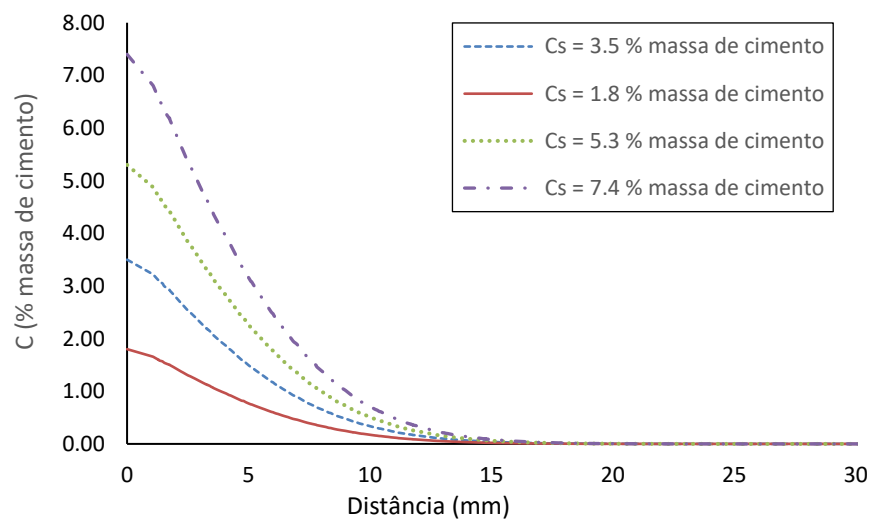
Tabela 4.4 – Valores de concentração superficial utilizados

Concentração Superficial (% massa de cimento)	Zona de exposição
1,8	Baixa
3,5	Moderada
5,3	Alta
7,4	Severa

Fonte: Autora

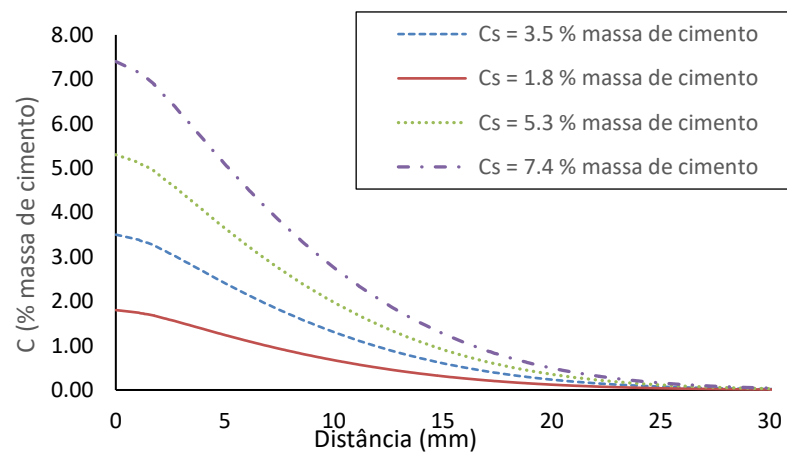
As Figura 4.11 e 4.12 apresentam a variação da concentração de cloretos para os 4 valores de concentração superficial apresentados na Tabela 4.4 após 1 ano e 5 anos, respectivamente.

Figura 4.11 – Variação da concentração de cloretos após 1 ano



Fonte: Autora

Figura 4.12 – Variação da concentração de cloretos após 5 anos



Fonte: Autora

Os resultados demonstram que a medida que a concentração superficial aumenta, a concentração de cloretos dentro do concreto também aumenta. E com o tempo, essa concentração pode aumentar mais significativamente e atingir a distância do cobrimento em um menor tempo de exposição. Essa análise evidencia a correta definição da concentração superficial para a previsão de vida útil, o que estabelece a zona de exposição aonde a estrutura está localizada. Por fim, destaca-se a importância de analisar corretamente a localização da estrutura e verificar o ambiente em relação a exposição da estrutura a cloretos.

b) Combinação de cloretos

Um segundo parâmetro importante na previsão de vida útil de estruturas de concreto é como o modelo numérico considera a força motriz, fato destacado na seção 2.4. Apenas os cloretos livres são responsáveis pelo processo de corrosão nas armaduras do concreto. Assim, essa seção verifica o efeito da utilização da combinação de cloretos, relação entre cloretos combinados e cloretos livres. As simulações consideram o modelo sem combinação de cloretos e com combinação de cloretos de forma linear (Tabela 4.5). Nessa simulação a temperatura também foi considerada constante e igual a 23°C.

Tabela 4.5 – Tipos de combinação de cloretos considerados

Isotérmica	C_{bc}	Fatores
Sem combinação	$C_{bc} = 0$	- C_{bc} : concentração de cloretos combinados
Linear	$C_{bc} = \alpha C_{fc}$	- α : fator que depende do sistema cimentício - 0,07 Martin-Perez (1999) - C_{fc} : concentração de cloretos livres

As Figuras 4.13 e 4.14 evidenciam os resultados obtidos considerando a difusão de cloretos sem combinação de cloretos e com combinação linear após 1 ano e 5 anos, respectivamente.

Figura 4.13 – Comparação entre resultados da concentração de cloretos sem combinação de cloretos e combinação linear após 1 ano

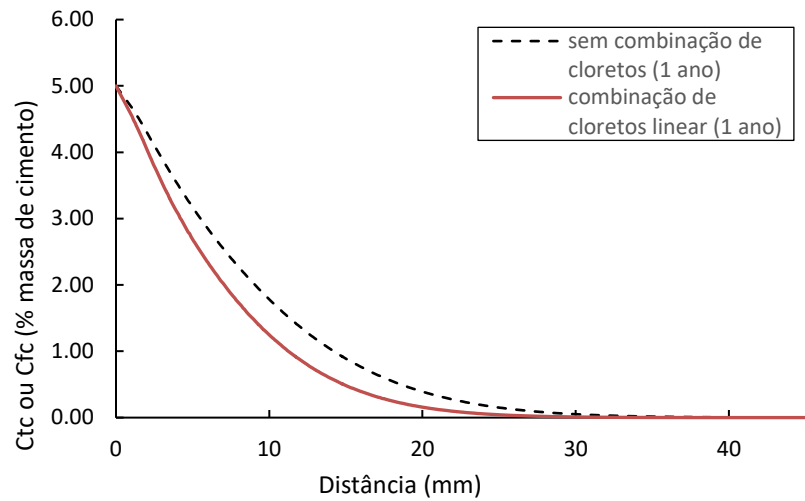
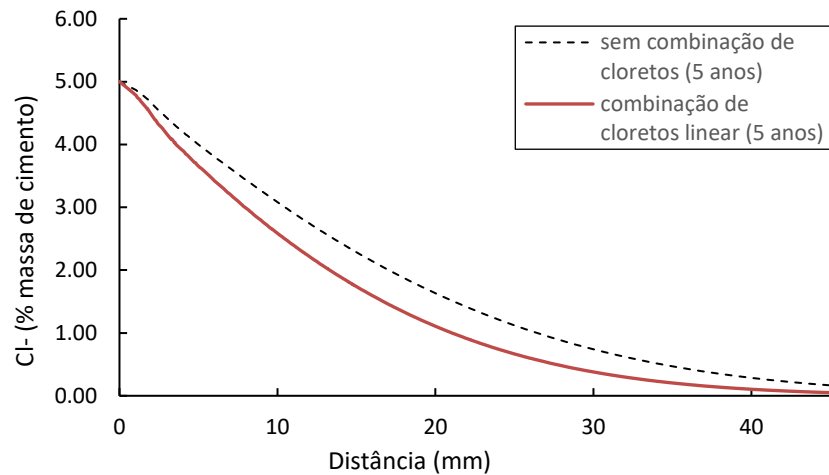


Figura 4.14 – Comparação entre resultados da concentração de cloretos sem combinação de cloretos e combinação linear após 5 anos



Assim, os resultados evidenciam que a variação de cloretos para a combinação linear é menor em comparação a não considerar a combinação. A Tabela 4.6 descreve os valores obtidos para os dois casos para a distância de 20mm de distância da superfície do concreto.

Tabela 4.6 – Valores de concentração de cloretos para combinação de cloretos linear e sem combinação de cloretos

Tempo	Sem Combinação de Cloretos	Combinação Linear
1 ano	0.392203	0.157976
5 anos	1.633683	1.108249

Fonte: Autora

Assim, a combinação linear é 32% menor que a não consideração da combinação de cloretos. A partir dos resultados, pode-se considerar que a combinação de cloretos é uma maneira conservadora de considerar a previsão de vida útil.

c) Temperatura e Umidade

Uma terceira análise é realizada para verificar a influência dos parâmetros climáticos na penetração de cloretos. Para essa análise, duas cidades foram selecionadas: a cidade de Vitória, localizada no Brasil e a cidade de Montreal, localizada no Canadá. A concentração superficial é igual a 5% massa de cimento. Os dados climáticos de cada cidade foram retirados dos dados climatológicos registrados por cada organização governamental, do BDMEP² (Bando de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) para a cidade brasileira e do Departamento de Recursos do Ambiente e Naturais³ do governo canadense. Esses dados podem ser verificado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros climáticos utilizados para as cidade de Vitória e Montreal

Parâmetros	Vitória	Montreal
Temperatura máxima	34,7 °C	27,4 °C
Temperatura mínima	15,2 °C	-23,7 °C
Dia max temperatura	319	192
Umidade máxima	0,9425	0,904
Umidade mínima	0,5375	0,509
Dia max umidade	312	288

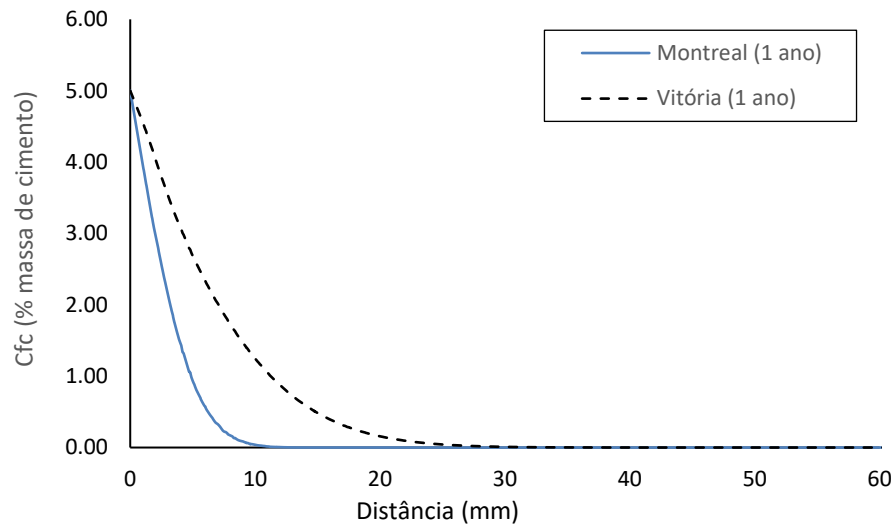
Fonte: Autora

Os resultados podem ser verificados nas Figuras 4.15 e 4.16 após 1 ano e 5 anos, respectivamente.

² BMDMEP. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>

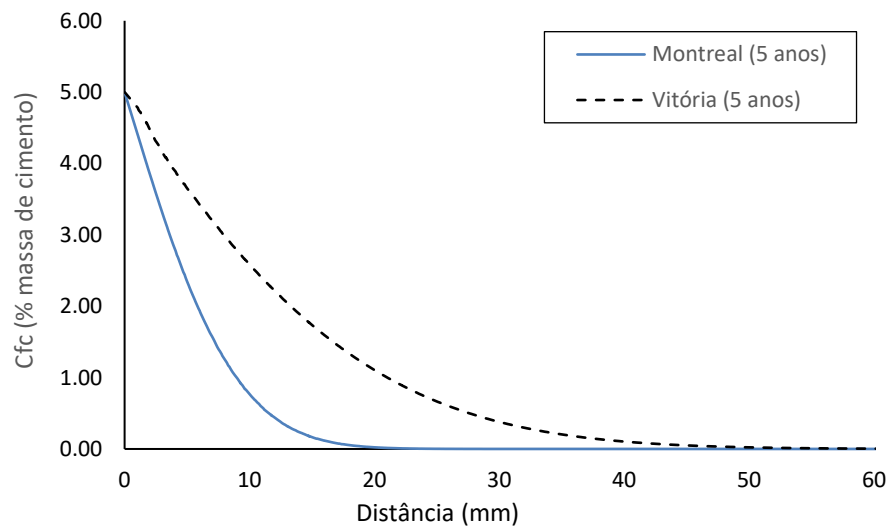
³ Disponível em: <http://climate.weather.gc.ca/>

Figura 4.15 – Comparação entre os resultados de concentração de cloretos obtidos para a cidade de Vitória e Montreal após 1 ano



Fonte: Autora

Figura 4.16 – Comparação entre os resultados de concentração de cloretos obtidos para a cidade de Vitória e Montreal após 5 anos



Fonte: Autora

Os resultados demonstram a sensibilidade da difusão de cloretos em relação a variação da temperatura. Não existem muitos estudos que demonstram a diferença de concentração de cloretos se considerarmos a mesma estrutura de concreto em diferentes regiões considerados seus dados climatológicos. Nessa análise os parâmetros climáticos de cada região são

considerados. Assim, é interessante destacar que pelos resultados a região mais quente contribui para difusão de íons cloreto no concreto, o que corrobora com Gjorv (2015) que maiores temperaturas contribuem para a difusão de cloretos no concreto. Esses resultados evidenciam que a temperatura, a localização da estrutura, é uma fator crucial para a difusão de íons cloretos.

É importante salientar que os resultados apresentados não visam encontrar valores exatos para a concentração de cloretos, uma vez que se realizou apenas uma análise isolada do impacto de certos parâmetros na difusão de íons cloretos em estruturas de concreto. Dessa forma, o resultados podem ser interpretados para verificar a influência de cada parâmetro no período de iniciação da estrutura.

4.6 PREVISÃO DE VIDA ÚTIL E PROJETOS DURAVÉIS

Essa seção representa a aplicação do modelo para o design de projetos duráveis, ou seja, aplicação do modelo para a construção de novas estruturas de concreto em relação ao projeto de durabilidade. A intenção desse estudo é verificar o tipo de concreto e cobrimento necessário para garantir a vida útil desejada para determinado ambiente.

Para verificarmos o uso do modelo para esse tipo de aplicação, a simulação considera o exemplo realizado na seção 4.2, um viga de concreto representada pela Figura 4.1 e malha gerada na Figura 4.2 com entrada de cloretos pela esquerda. Para o design de novas estruturas, o ideal é obter todos os parâmetros necessários para modelar de forma mais realística possível as características do concreto no modelo. No entanto, raramente encontram-se estudos que contemplam todas as variáveis necessárias para considerar o concreto no modelo.

Dessa forma, 5 tipos de concreto foram selecionados do estudo realizado por Nokken *et al.* (2006). Esse estudo foi selecionado pelo motivo de fornecer o coeficiente de difusão de referência $D_{c,ref}$ dos concretos analisados e o valor do fator de redução da idade para a difusão de cloretos (m). Dessa maneira, com esses dois valores de entrada, o tipo de concreto será melhor representado pelo modelo. As informações sobre os concretos pode ser verificada na Tabela 4.8 e os parâmetros de entrada de cada concreto na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 – Características de cada tipo de concreto selecionado

Código	Cimento (kg/m³)	Silica Fume (kg/m³)	Slag (kg/m³)	Fly Ash (kg/m³)
2A	442	18	-	-
2D	345	*	115	-
3A	375	-	-	-
3B	345	30	-	-
3E	330	-	-	45
3G	330	75	-	-

Fonte: Adaptado de Nokken et al. (2006)

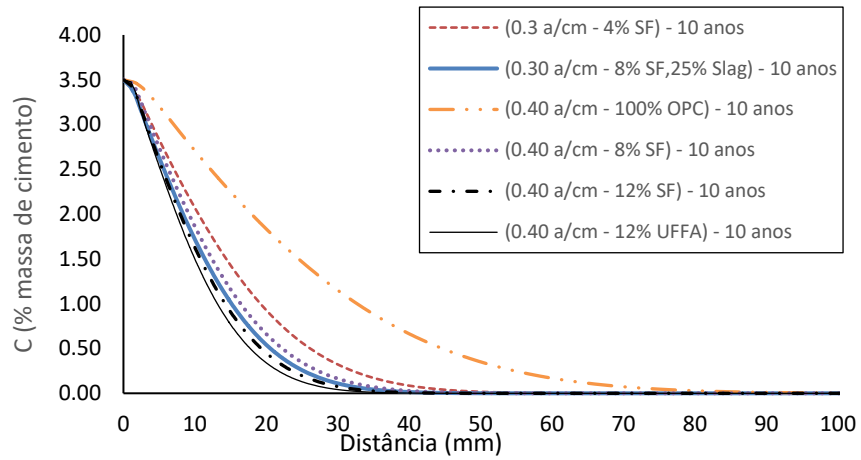
Tabela 4.9 – Parâmetros de entrada para os tipos de concreto selecionado

Código	Tipo de Concreto	a/cm	$D_{c,ref}$ (10e-12 m²/s)	T_{ref}	t_{ref} (s)	m
2A	0.3 a/cm - 4% SF	0.3	3.75	23	90	0.6
	0.30 a/cm - 8% SF, 25%					
2D	Slag	0.3	1.06	23	365	0.75
3A	0.40 a/cm - 100% OPC	0.4	10.3	23	90	0.58
3B	0.40 a/cm - 8% SF	0.4	3.3	23	90	0.72
3E	0.40 a/cm - 12% UFFA	0.4	2.79	23	90	0.91
3G	0.40 a/cm - 12% SF	0.4	1.88	23	90	0.57

Fonte: Adaptado de Nokken et al. (2006)

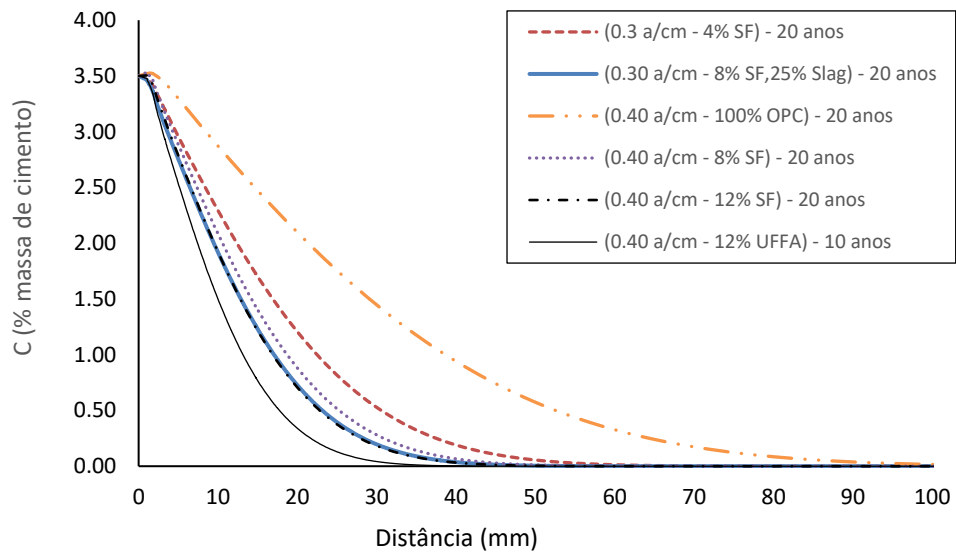
A viga é localizada na cidade de Vitória, assim os parâmetros climáticos considerados representam a cidade. A concentração superficial foi escolhida para 3,5 % massa de cimento para representar uma zona de exposição moderada. As Figuras 4.17 a 4.19 demostram a concentração de cloretos considerando os diferentes tipos de concreto após 10 anos, 20 anos e 30 anos.

Figura 4.17 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto após 10 anos



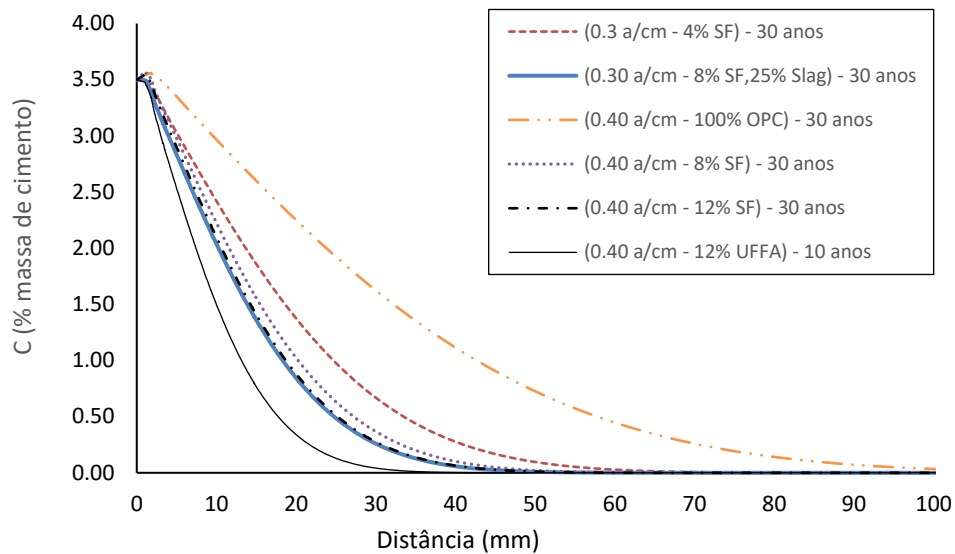
Fonte: Autora

Figura 4.18 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto após 20 anos



Fonte: Autora

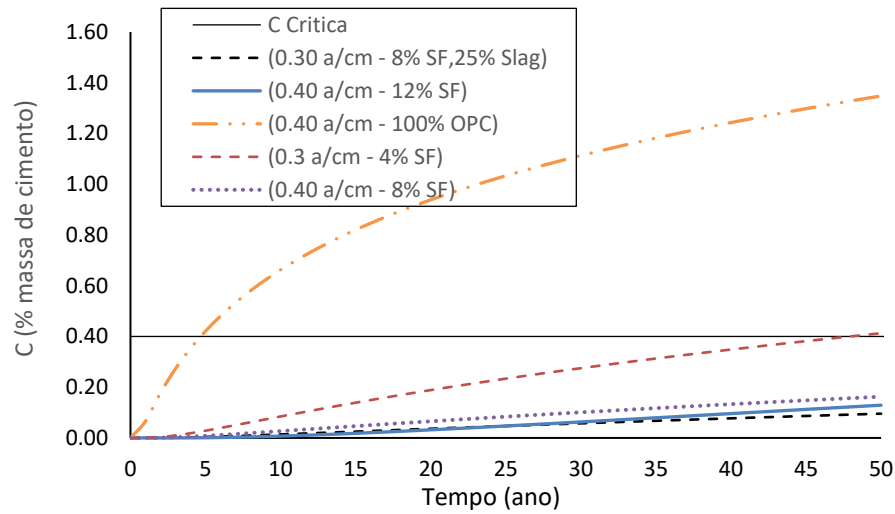
Figura 4.19 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto após 30 anos



Fonte: Autora

Como pode ser verificado nas Figuras 4.17 a 4.19, o concreto OPC (*Ordinary Portland Cement*) apresenta as maiores concentração de cloretos dentre os perfis apresentados, como já bem destacado na literatura. É perceptível a diferença entre este e todos os outros perfis, isso pode ser explicado pelo alto valor do coeficiente de difusão de referência para o concreto OPC e menor valor de m . Consequentemente, com o tempo, uma estrutura com esse tipo de concreto apresentará maiores concentrações de cloretos com o tempo. Para uma análise criteriosa, um cobrimento de 40 mm foi selecionado para verificar o comportamento dos tipos de concreto em relação a uma vida útil desejada de 50 anos. A Figura 4.20 apresenta a variação de cloretos por tempo para um ponto localizado a 40 mm da superfície da vida de concreto.

Figura 4.20 – Variação da concentração de cloretos para diferentes tipos de concreto



Fonte: Autora

Através dos resultados apresentados, pode-se observar a grande influência do tipo de concreto e da correta definição dos parâmetros relativos ao concreto para a simulação da previsão de vida útil da estrutura. Observa-se que o concreto com menor materiais cimentícios suplementares apresentou maiores valores de concentração de cloretos em comparação com os outros tipos de concreto com adições. Ao considerar-se o valor de 0,4% como concentração crítica para despassivação da armadura, valor comum no meio técnico, tem-se que a armadura estaria despassivada em pouco mais de 5 anos para o concreto 3A (OPC) e 48 anos para o concreto 2A (0,3 a/cm – 4% SF), para os outros tipos de concreto, a concentração de cloretos se mantém muito menor que a concentração crítica de cloretos, não sofrendo despassivação da armadura.

Dessa forma, é interessante uma investigação do cobrimento, a Tabela 4.10 descreve o cobrimento necessário para os concretos 2A e 3A para um vida útil de 50 anos. O cobrimento aqui definido é a distância quando a concentração crítica de cloretos foi atingida após 50 anos.

Tabela 4.10 – Valores do cobrimento para uma vida útil de 50 para os concretos 2A e 3A

Concreto	Cobrimento (mm)
2A	41
3A	70

Fonte: Autora

Assim, para o concreto 3A, um cobrimento de 70 mm seria necessário para garantir a vida útil da estrutura de 50 anos para a cidade de Vitória; em contrapartida, para o concreto 2A, o cobrimento de 41 mm, seria necessário. Os resultados demonstraram a grande sensibilidade da concentração de cloretos a partir do tipo de concreto que será utilizado para a estrutura. Assim, um modelo de previsão é uma ferramenta crucial para a investigação e análise da previsão de vida útil para o projeto de durabilidade de novas estruturas. Entretanto, não há grande estudos que demonstrem a utilização do modelo numérico para essa previsão, seja pela falta de dados de entrada que representam o concreto ou seja pela complexidade do modelo numérico.

4.7 PREVISÃO DE VIDA ÚTIL PARA ESTRUTURAS EXISTENTES

Essa seção é referente ao segundo uso dos modelos de previsão de vida útil que diz respeito a previsão de vida útil de estruturas de concreto existentes. Como já destacado anteriormente nessa dissertação, existe uma lacuna na literatura referente ao uso do modelo para situações de tempo de exposições longas. Muitos fatores contribuem para a dificuldade desse tipo de simulação sejam elas, a dificuldade na coleta da concentração de cloretos dos perfis de cloretos, poucos dados sobre o concreto da estrutura ou ambiente da estrutura e muitas outras informações já foram perdidas para as estruturas de longa exposição. Além disso, outro problema evidenciado nessa análise é que não há muitos estudos em que seja possível extrair as informações necessárias para o uso dos modelos numéricos.

Seguindo esse contexto, essa dissertação realizou dois estudos de previsão de vida útil de estruturas existentes. O primeiro é referente ao estudo realizado no artigo de Cavalaro *et al.* (2015) que obteve os perfis de cloreto para as vigas de concreto de uma usina termoeletrica. O segundo estudo é o realizado pela autora na 3ª Ponte, localizada na cidade de Vitória.

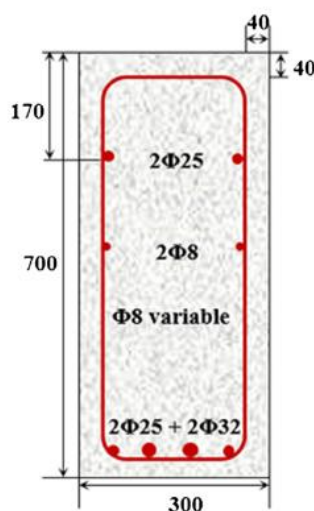
4.7.1 Estrutura do Estudo de Cavalaro *et al.* (2015)

A estrutura de concreto considerada para avaliar o modelo de penetração de cloretos descrito nessa seção foi objeto de estudo de Cavalaro *et al.* (2015). O estudo de caso consiste em uma usina termoeletrica, localizada a menos de 500 m do oceano. Após três anos de serviço, a estrutura mostrava graves sinais de deterioração da estrutura tanto no exterior como no interior da torre de resfriamento da usina, inclusive sinais de deterioração do cobrimento devido a corrosão da armadura. Assim, várias amostras foram retiradas de diferentes partes da estrutura

da torre de resfriamento da usina, para um tempo de 18,5 meses. Os perfis de cloreto foram obtidos seguindo a norma NT-BULD 443.

Esta dissertação considera os perfis obtidos das amostras retiradas externamente para as vigas de concreto armado (Figura 4.21). As vigas consideradas são seções retangulares e com concreto com $f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$. A quantidade de cimento foi estimada para 400 kg/m^3 . As vigas estão localizadas no nível intermediário da torre de resfriamento e estão em contato direto com água quente, presumisse contato com água constante. A armadura principal é localizada na parte de baixo na viga e consiste de duas barras de diâmetro de 25 mm e duas barras de diâmetro de 32 mm. A viga possui 700 mm de altura e 300 mm de largura e cobrimento de projeto de 40 mm (Figura 4.21) .

Figura 4.21 – Seção transversal da viga de estudo

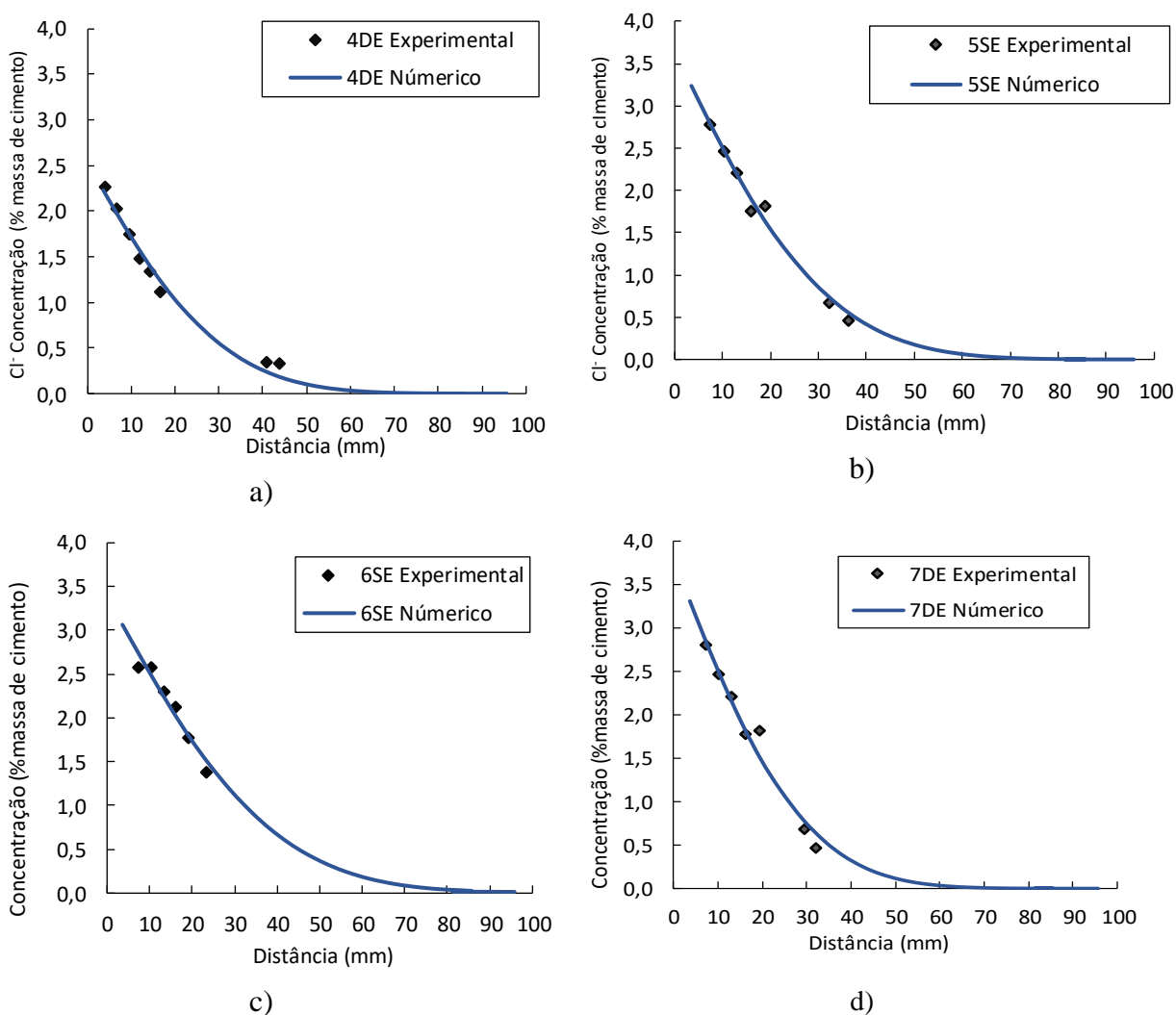


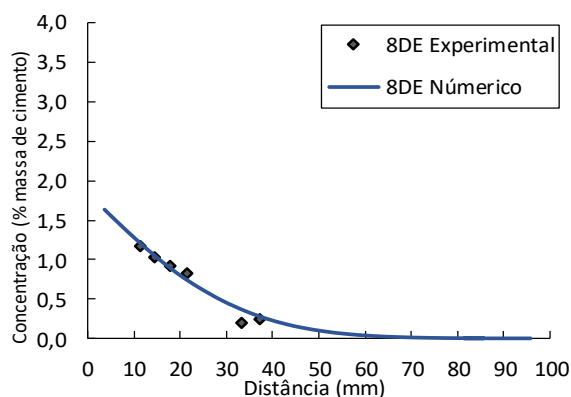
Fonte: Cavalaro *et al.* (2015)

Os perfis escolhidos são representativos da zona de exposição 1, definido em Cavalaro *et al.* (2015), situação que não considera o efeito de secagem e molhagem. Os perfis de cloretos foram ajustados com o modelo desenvolvido nessa dissertação apenas considerando o mecanismo da difusão. Para considerar o efeito da temperatura no coeficiente de difusão, a temperatura média de serviço da água em contato com a viga é de 33°C . O efeito de envelhecimento do concreto também foi considerado, por falta de maiores informações sobre o concreto, o valor do fator de redução de idade (m) foi considerado igual a 0,264 como sugerido por Bamforth (1998) apud Martín Perez (1999) para concreto de Portland comum.

A Figura 4.22 mostra as curvas ajustadas aos perfis de cloreto obtidos. Como sugerido por diversos autores (ANDRADE; DIEZ; ALONSO, 1997; ANN; AHN; RYOU, 2009) também considerado por Cavalaro *et al.* (2015), os primeiros pontos foram ignorados da análise, por poderem sofrer influências de fenômenos como a carbonatação, diferenças na composição do concreto e na construção, efeito pele e outros. A Tabela 4.11 mostra os resultados obtidos para o coeficiente de difusão e concentração superficial para cada amostra.

Figura 4.22 – Perfis de cloretos para cada amostra e curvas ajustadas a) 4DE b) 5SE c) 6SE d) 7DE e) 8DE f) Previsão de vida útil.





e)

Tabela 4.11 – Valores obtidos a partir dos valores obtidos da curva

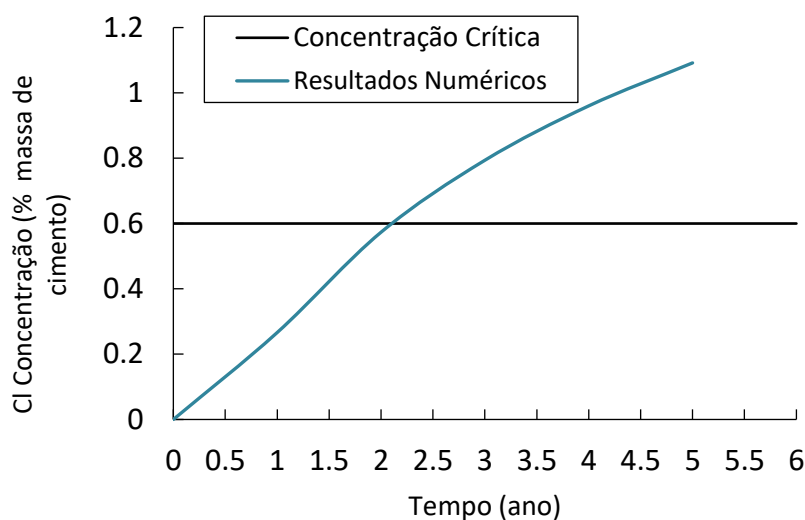
Amostra	Cs (% massa de cimento)	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)
4DE	2,52	2,36
5SE	3,65	2,54
6SE	3,38	3,85
7DE	3,78	2,13
8DE	1,83	2,87

De acordo com a Figura 4.22 e Tabela 4.11, o modelo possui uma boa aproximação com os perfis de cloreto dos dados de campo. Os resultados obtidos por Cavalaro *et al.* (2015) avaliaram a importância da previsão do tempo de iniciação para o estudo da torre de resfriamento. Os autores encontraram um tempo de iniciação por volta de 2 anos, o que sugere que as considerações de durabilidade de projeto não foram adequadas dada o baixo valor da previsão do tempo de iniciação.

Os diferentes valores de coeficiente de difusão sugerem diferentes condições de exposição, considerando que o elemento de concreto seguiu condições similares de fabricação e dosagem. Para esse resultado, os autores consideraram a média dos coeficientes de difusão obtidos para a previsão de vida útil. Metodologia que será empregada nesse artigo para calcular a concentração de cloretos com o tempo e avaliar a previsão de vida útil. A concentração crítica de cloretos foi definida para 0,6 % massa de cimento para estruturas de concreto armado como sugerido pelo código de concreto da Espanha (CAVALARO *et al.*, 2015).

A Figura 4.23 mostra a variação da concentração de cloretos com tempo em pontos próximos a superfície da armadura.

Figura 4.23 – Concentração de cloretos com o tempo no cobrimento da viga



Fonte: Autora

Para se atingir a concentração crítica de cloretos, um tempo igual a 2,12 anos é necessário. Assim, verifica-se que o período de iniciação apresentou uma baixa vida útil. Esses resultados corroboram com a necessidade de se prever o período de iniciação para uma estrutura de concreto em ambiente agressivo e a importância de um projeto de durabilidade condizente com a agressividade do local e com uma escolha adequada de cobrimento e tipo de concreto.

4.8 ANÁLISE DO PILAR LOCALIZADO NA 3ª PONTE DA CIDADE DE VITÓRIA

O estudo que se segue foi parte de um projeto em parceria com a empresa Recuperação e a empresa Rodosol Rodovia do Sol para verificar os perfis de cloretos para um pilar da ponte localizada na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo (20° 19' 10" S, 40° 20' 16" W). Ponte Dep. Darcy Castello de Mendonça (3ª Ponte). A ponte possui 3.339 metros de extensão, sendo o vão central de estrutura de aço com 714 metros de extensão. A Figura 4.24 mostra a superestrutura e pilares da ponte. O vão livre para navegação é de 260 metros e garante o acesso

ao porto da cidade de Vitória. A ponte possui 54 pilares em terra e 7 sobre o mar, com altura máxima de 57 metros. A obra foi finalizada durante a década de 80, consumindo 94400 m³ de cimento e 11400 toneladas de aço.

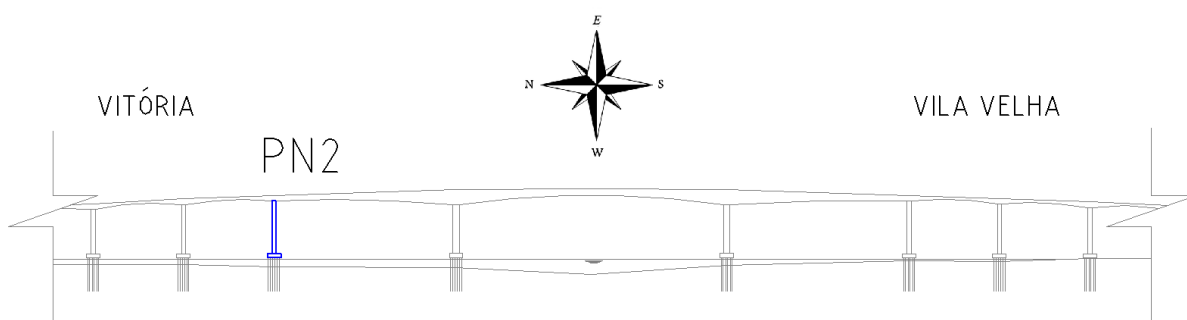
Figura 4.24 – Fotografia da ponte de concreto investigada



Fonte: Autora

Este artigo apresenta a análise de previsão de vida útil do pilar de concreto armado PN2 (Figura 4.25) da ponte, localizado na região central. O pilar possui uma seção transversal retangular vazada com 11 m de comprimento e 4 m de largura, com cobrimento da armadura de 3,75 cm. Por meio de análise visual, percebe-se que o pilar escolhido, assim como o restante da estrutura, não apresenta sinais de corrosão ou deterioração grave do concreto. Amostras do pilar foram retiradas das faces norte e oeste, a uma altura média de 8,2 metros do nível médio do mar. Em seguida, as amostras foram preparadas e enviadas para laboratório do IFPB para o cálculo da concentração de cloretos totais e livres de acordo com a norma da ASTM C1152.

Figura 4.25 – Localização do pilar PN2 da ponte



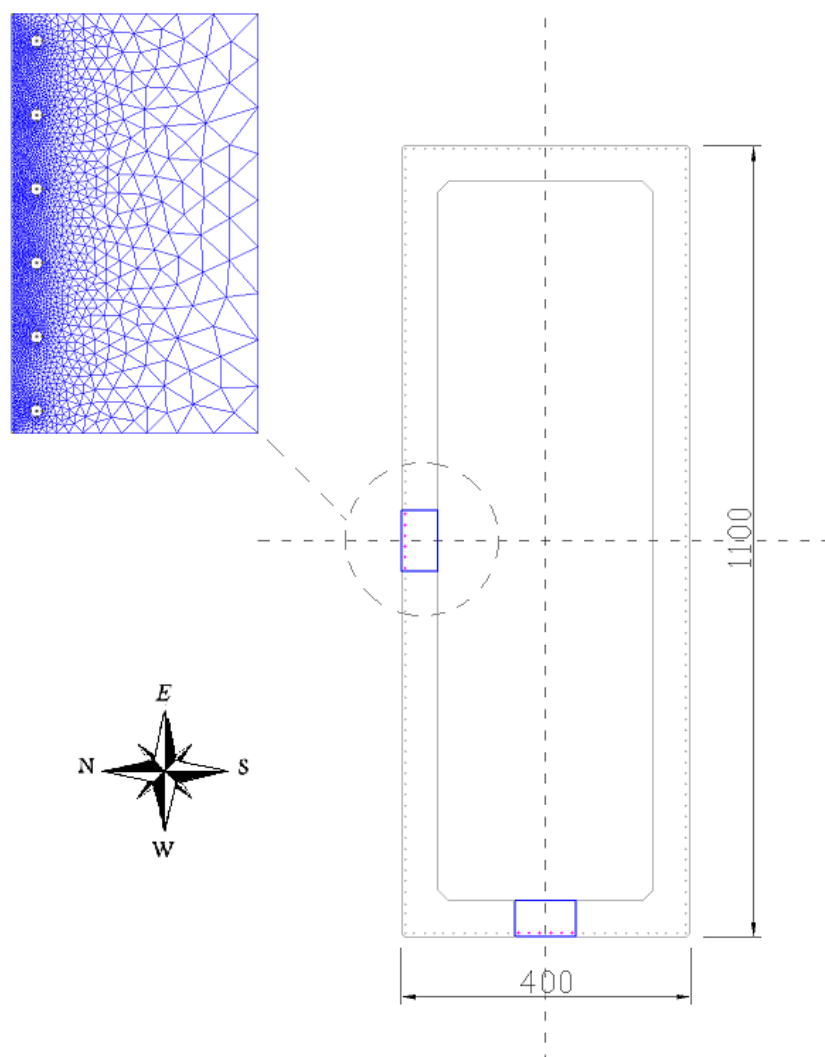
Fonte: Autora

Os parâmetros ambientais foram adotados de acordo com a localização da estrutura. Os dados climáticos foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). No período avaliado, a cidade de Vitória registrou uma temperatura média máxima de $26,9^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura média mínima de $21,7^{\circ}\text{C}$, evidenciando as altas temperaturas de um clima tipicamente tropical. A umidade da cidade de Vitória é relativamente alta ao longo do ano, com umidade média máxima de 80% e média mínima 77%. A concentração inicial de cloretos foi considerada nula em todas as simulações. Assim, o fluxo de umidade e transferência de calor foram considerados nessa análise acopladas com o transporte de íons cloreto.

Para a análise numérica, optou-se pela utilização de apenas parte da seção transversal do pilar, sendo selecionado um trecho de 85 cm de comprimento no centro de cada face. A escolha da divisão da seção do pilar em seções menores deve-se ao local da retirada das amostras, realizada no meio do pilar, e à possibilidade de utilizar uma malha fina na região do cobrimento de concreto (3,75 cm) sem aumentar demasiadamente o trabalho computacional. A malha na região do cobrimento deve ser pequena o suficiente para ser possível gerar resultados confiáveis. As regiões de quinas do pilar são influenciadas pelas concentrações superficiais de ambas as faces, o que poderia gerar erros na comparação entre os valores experimentais e numéricos.

As seções adotadas apresentam um comprimento de 0,85 m e uma espessura de 0,50 m. A Figura 4.26 retrata essa divisão e a malha desenvolvida. A malha para o método dos elementos finitos foi gerada utilizando um software externo livre (GMSH), adotando elementos triangulares. A malha apresenta 5901 elementos e 3105 nós.

Figura 4.26 – Divisão do pilar do concreto selecionado para a simulação numérica



Fonte: Autora

O tempo de exposição da estrutura é de 36 anos, referente ao intervalo do ano de concretagem dos pilares (1980) até a retirada das amostras (2016). A análise numérica é incremental, para cada *time step* o valor da concentração de cloretos em cada nó é calculado. Foram realizados testes com diversos valores de *time step* e de dimensão dos elementos da malha até que as alterações não causassem diferenças significativas nos resultados, observando o custo computacional. O time step definido é de 5 dias. A Tabela 4.12 relata o resumo de todos os dados de entrada para a análise numérica realizada.

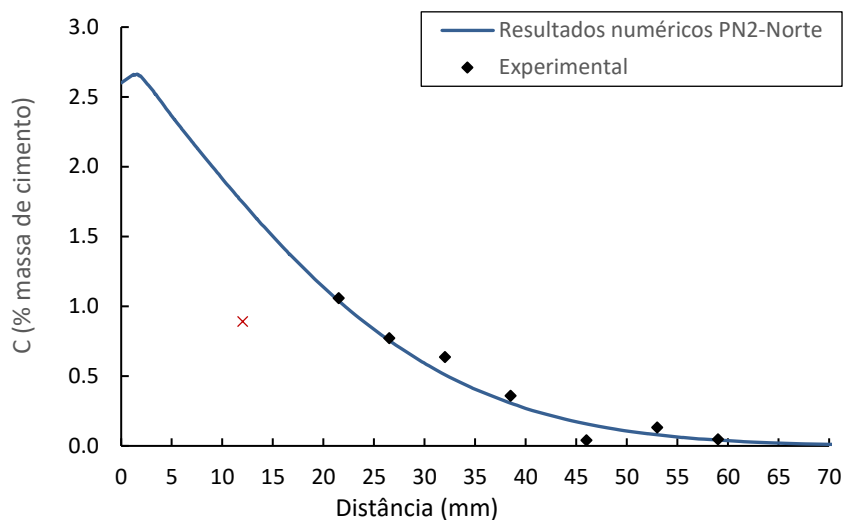
Tabela 4.12 – Resumo dos parâmetros de entrada para o modelo numérico

Parâmetros	Valor
Geometria	Dimensões
	85 cm x 50 cm
	Cobrimento de concreto
	37,5 mm
Malha	Tipo de elementos
	Triangular linear
	Número de nós
	Número de elementos
	5901
Parâmetros de tempo	Tempo final (T)
	36 anos
	Passo de tempo (Δt)
	5 dias
Condição Inicial	Concentração inicial (C_0)
	0 %
Coeficiente de difusão	Temperatura de referência (T_{ref})
	23 °C
	Idade de referência (t_{ref})
	120 dias
	Energia de ativação (U)
	44,6 kJ/mol
	Fator de redução (m)
	0,264 (cimento Portland puro)
	Parâmetro de umidade (h_c)
	0,75
Temperatura	Máxima (°C)
	26,9
	Mínima (°C)
	21,7
	Dia da máxima anual
	45
Umidade relativa	Máxima (%)
	80
	Mínima (%)
	77
	Dia de máxima anual
	285

Fonte: Autora

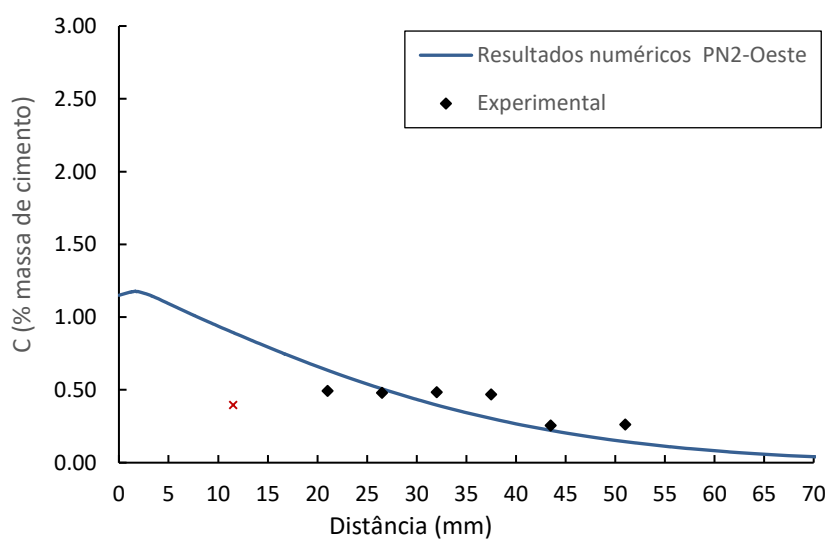
Assim, os perfis experimentais de cloreto foram ajustados com o modelo numérico dessa dissertação, de modo a determinar o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos. Para o ajuste, foram excluídas as medidas efetuadas entre 5-12 mm para evitar efeitos marginais, como realizado na seção anterior. Os perfis de cloreto e as curvas ajustadas nos dados experimentais da face norte e da face oeste são apresentados nas Figura 4.27 e Figura 4.28, respectivamente.

Figura 4.27 – Curvas ajustados nos perfis de cloretos da face norte do pilar (PN2-N)



Fonte: Autora

Figura 4.28 – Curvas ajustados nos perfis de cloretos da face oeste do pilar (PN2-N)



Um bom ajuste pode ser observado entre os dados experimentais e os resultados obtidos pelo modelo. A Tabela 4.13 exibe os parâmetros resultantes do ajuste realizado. A tendência do comportamento dos perfis de cloreto é apresentar maiores concentrações logo após a superfície, reduzindo gradualmente a medida que se distancia da superfície. Essa taxa de diminuição depende da penetração de cloretos nos poros do concreto que, por consequência, depende do coeficiente de difusão do material. É comum em dados experimentais pontos próximos

apresentarem pouca variação entre as concentrações, principalmente para o caso em que as concentrações superficiais são baixas, como observado em Cavalaro et al (2015). Essa característica foi observada para os dados experimentais da face oeste (Figura 4.28). Nessa situação, a tendência de decaimento dos íons cloreto ainda é observada nos dados subsequentes.

Tabela 4.13 – Melhor ajuste do coeficiente de difusão e concentração superficial

Elemento estrutural	Location	Cs (% cement wt)	D (x 10 m ² /s)
Pilar	Norte (N)	2.6	1.12
	Oeste (O)	1.15	2.04

Fonte: Autora

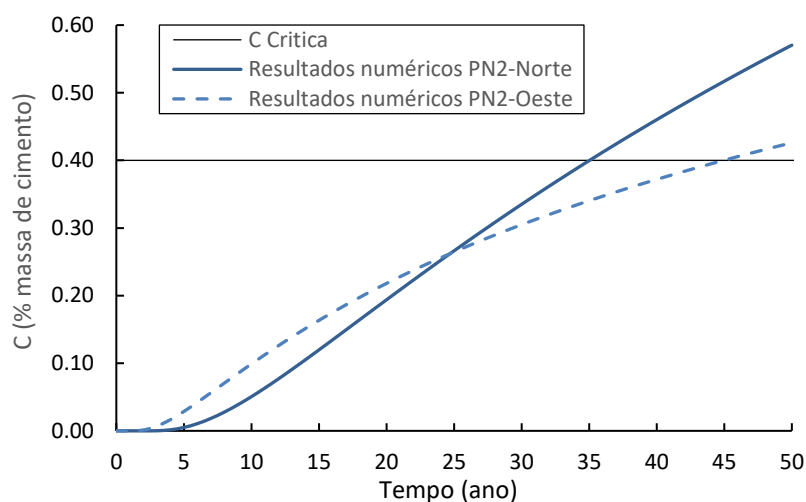
Os diferentes valores de coeficiente de difusão e concentração superficial encontrados na Tabela 4.13, evidenciam uma clara distinção entre as duas faces do pilar. Em consequência, um único coeficiente de difusão não pode ser definido para o pilar. A face oeste apresenta uma maior facilidade à penetração de cloretos, comprovada pelo valor mais elevado do coeficiente de difusão (D). Durante a retirada das amostras, o concreto das duas faces do pilar encontrava-se visivelmente diferente, apresentando porosidades claramente distintas. Na face oeste, o concreto aparentava maior porosidade sendo pulverizado com mais facilidade. É provável que essa distinção entre o material de cada face tenha sido originada por desvios na construção.

Os diferentes valores de concentração superficial evidenciam diferentes condições de exposição. Quanto ao caso em estudo, a face norte encontra-se em posição mais desfavorável, uma vez que está voltada para a região de maiores ondulações no mar, estando assim mais exposta a respingos de sal. Além disso, a face norte possui relativa proteção contra a chuva, que poderia lavar periodicamente o sal da superfície do concreto. A concentração superficial do concreto depende ainda da capacidade de combinação de cloretos do concreto e da porosidade da superfície (DA COSTA et al., 2013; MEIRA et al., 2008), variáveis que, como salientado, são diferentes nas duas faces. Os valores encontrados corroboram os valores obtidos por outros autores em estruturas sujeitas a exposição ambiental marinha e região não saturada (FERREIRA, 2004).

A previsão de vida útil do pilar é realizada a partir dos dados de coeficiente de difusão e concentração superficial obtidos anteriormente. Para cada face é possível verificar o

comportamento do concreto quanto à difusão de íons cloreto. Nessa seção, foi definido um valor conservador para a concentração crítica de cloretos, de 0,4% da massa de cimento. A Figura 4.29 mostra a concentração de íons cloreto na região da armadura ao longo dos 50 anos para cada face do pilar, podendo também ser observado a concentração crítica de cloretos.

Figura 4.29 – Variação da concentração de cloretos por ano para PN2-N e PN2-O



Fonte: Autora

Os resultados obtidos evidenciam que a face norte do pilar apresenta risco de início do processo de corrosão após 35 anos. Esse resultado demonstra que a concentração superficial é um parâmetro crucial para a previsão de vida útil da estrutura. O baixo valor do coeficiente de difusão da face norte, em relação à face oeste, não foi suficiente para impedir a difusão de íons cloreto na estrutura. Como consequência do maior valor de concentração superficial, a face norte está mais propensa a danos por corrosão causada por cloretos. Por outro lado, o impacto da menor concentração superficial registrada na face oeste leva esta face a apresentar maior vida útil. A Tabela 4.14 mostra os valores de concentração de cloretos na região da armadura para cada face do pilar, obtidos após 36 anos e 50 anos.

Tabela 4.14 – Valores de concentração de cloretos para PN2-N e PN2-O

Elemento Estrutural	Face	Tempo (anos)	C (% massa de cimento)
Pilar	Norte (N)	36	0,412
		50	0,570
	Oeste (W)	36	0,340
		50	0,426

Embora a concentração de cloretos na armadura tenha atingido o limite estabelecido de 0,4%, não se pode afirmar que a despassivação realmente ocorreu. Isto porque o valor adotado é uma estimativa conservadora. No entanto, conhecendo quando a corrosão possivelmente terá início, tem-se a oportunidade de reavaliar a necessidade de manutenção, impedindo o progresso da deterioração e gerando soluções de baixo custo econômico e baixo impacto ambiental.

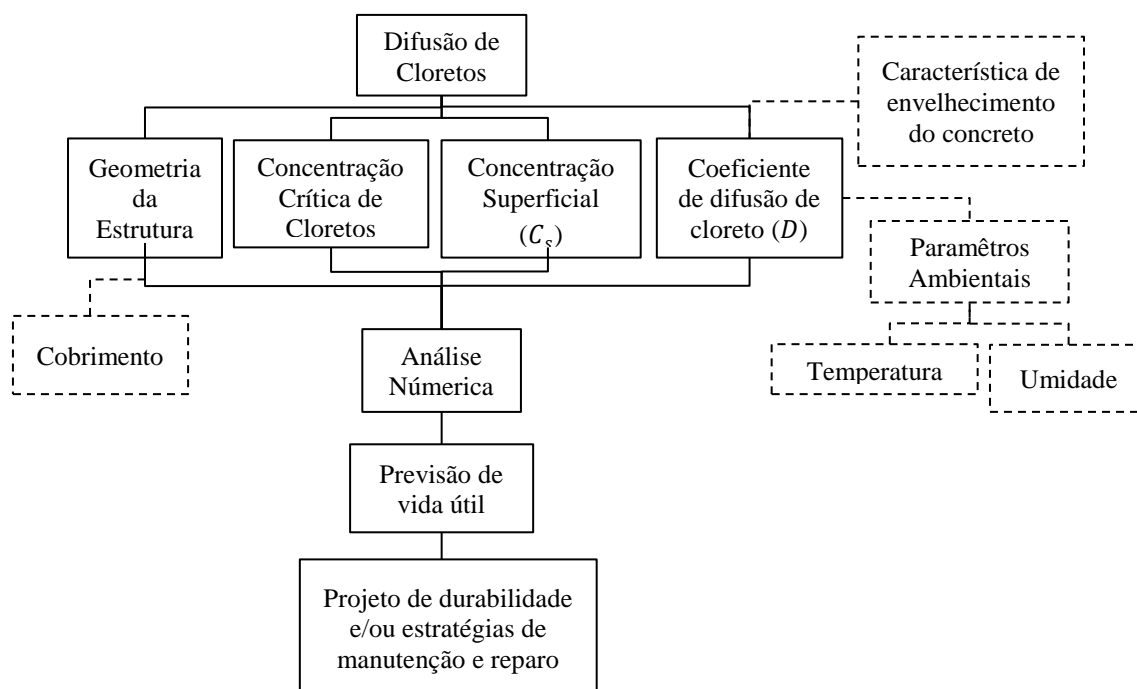
A partir dessa análise, fica evidente a região que está mais susceptível a deterioração por íons cloreto. Com essa informação, estratégias de manutenção ou reparo podem ser executadas baseadas na performance da estrutura de concreto. Assim, o uso do modelo numérico para estimar a vida útil da estrutura de concreto torna-se uma ferramenta fundamental para engenheiros e gestores.

4.9 RESUMO DA UTILIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PARA PROJETOS DURÁVEIS

A Figura 4.30 representa um resumo do processo desenvolvido para o uso do modelo na engenharia. Os parâmetros de entrada podem ser divididos em três grupos: características ambientais, características do concreto e geometria da estrutura. A escolha de uma nova estrutura de concreto durável inicia-se na geometria da estrutura, principalmente na definição do cobrimento de concreto. O cobrimento depende da agressividade do ambiente, o que é definida a partir da concentração superficial. Como relatado, a concentração superficial influencia demasiadamente a difusão de cloretos e a adoção de valores inapropriados pode gerar erros na previsão da vida útil.

No Brasil, pesquisas que visam determinar a concentração superficial de determinada região do país ainda é uma lacuna na literatura e, assim, na maioria das vezes a escolha do parâmetro é feita com base em estudos já realizados em outras localidades. Já foi relatado a variabilidade da concentração crítica de cloretos, no entanto, este parâmetro ainda depende do tipo de aço que será utilizado na estrutura de concreto. Aços especiais, como aços galvanizados ou aço inox podem apresentar uma concentração crítica maior que a concentração do aço carbono convencional, resultando em estruturas expressivamente mais duráveis.

Figura 4.30 – Processo e parâmetros para a previsão de vida útil



Fonte: Autora

Para estruturas existentes o modelo desenvolvido nessa dissertação oferece fundamentação para definição do plano de manutenção, com base na deterioração por corrosão. Como ilustrado para o pilar da ponte analisada ou para a viga do estudo de Cavalaro *et al.* (2015), pode-se identificar peças onde há necessidade de alguma atitude de reparo.

Para o projeto de novas estruturas duráveis, o modelo permite a tomada de decisões baseadas na performance do material em determinado ambiente. Os parâmetros principais para o ingresso de íons cloreto no concreto são: o cobrimento da estrutura e geometria da estrutura, a concentração crítica de cloretos, a concentração superficial e o coeficiente de difusão do concreto. Uma decisão coerente envolvendo durabilidade não é uma tarefa fácil, devido a quantidade de variáveis que podem interferir nesse processo, como a própria variabilidade e heterogeneidade do concreto, que dificulta a simulação perfeita desse material.

Do ponto de vista prático, o modelo oferece uma alternativa matemática para a base de decisões de projetos de durabilidade, a partir das propriedades do material, das condições ambientais e geometria da estrutura. Cabe ao engenheiro escolher a solução mais favorável que atenda as exigências de durabilidade e custo da construção. Projetos duráveis garantem uma considerável

economia por minimizar o custo de manutenção e o uso de materiais e energia. Projetar para uma alta vida útil representa uma engenharia que se preocupa com a sustentabilidade. A vida útil da estrutura deve ser analisada de um ponto de vista amplo, que envolve projeto, execução, materiais, uso, operação e manutenção sob o enfoque de desempenho e sustentabilidade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Um quantidade considerável de modelo numéricos já foram desenvolvidas na literatura, no entanto, ainda não há uma abordagem amplamente aceita para a previsão da vida útil de estruturas de concreto sujeitas a corrosão das armaduras. Além disso, fatores como a falta de tradição no uso dos modelos numéricos, de experiência por parte dos usuários e a falta de aplicação do modelo para estruturas reais afim de predizer o comportamento e resposta da estrutura, trazem uma relutância na utilização desses tipos de modelo por parte de engenheiros.

Assim, essa pesquisa apresenta um modelo numérico de transporte de íons cloretos no concreto armado. Esse modelo considera a difusão e convecção no transporte de cloretos, o fluxo de umidade e transferência de calor no concreto para determinar a concentração de cloretos no concreto no tempo e no espaço. O modelo utiliza do método dos elementos finitos bidimensional para mapear uma geometria e resolver suas equações diferenciais. O uso de diferentes softwares livres em conjunto contribui para a velocidade de processamento do modelo numérico e contribuiu para o acoplamento de diferentes equações diferenciais. Além disso esse modelo aperfeiçoou os problemas de convergência para as condições de contorno e fluxo de umidade antes destacados por Suzano (2017).

Primeiramente para verificar a confiabilidade do modelo, este foi comparado com soluções analíticas e outros modelos numéricos desenvolvidos. A partir disso, os principais mecanismos de transporte de cloretos, difusão e convecção, foram analisados afim de compreender a influência desses mecanismos na concentração de cloretos no concreto. Com o intuito de identificar os efeitos dos principais parâmetros na concentração de cloretos, foram realizadas simulações contemplando a consideração da combinação de cloretos, a variação da concentração superficial e a localização da estrutura. Além disso, executou-se um estudo para o projeto de durabilidade de novas estruturas e de estruturas existentes com o modelo, de forma bidimensional, raramente utilizado na literatura. Por fim, um resumo do processo de utilização do modelo numérico é descrito.

5.2 CONCLUSÕES QUANTO AO MODELO E SUA UTILIZAÇÃO

O processo de corrosão está ligado a durabilidade de estruturas de concreto, o que gera a necessidade da aplicação de modelos de previsão de vida útil por engenheiros, tanto para o design do projeto de durabilidade para novas estruturas como para a manutenção de estruturas existentes. Poucos modelos são utilizados em estruturas reais ou verificados com amostras retiradas de estruturas reais. O modelo numérico proposto foi utilizado para a escolha do tipo de concreto para uma nova estrutura com vida útil desejada de 50 anos. Cinco tipos de concreto foram analisados para a estrutura em questão e o cobrimento necessário para essa análise é estabelecido, considerando o ambiente da estrutura.

O modelo foi utilizado para a previsão de vida útil de uma estrutura localizada na Espanha. Os perfis de cloretos obtidos foram ajustados ao modelo numérico para sua validação. Os resultados obtidos pelo modelo numérico de previsão de vida útil desenvolvido são comparados com os resultados de campo encontrados na literatura. O modelo proposto apresentou um bom ajuste com os perfis de cloreto obtidos da viga de concreto de uma torre de resfriamento. Variações de coeficiente de difusão para a estrutura foram observadas, o que sugere condições de exposição diferentes dependendo da localização da retirada da amostra. A partir disso, a previsão de vida útil foi realizada pelo modelo com os dados obtidos. Assim a estrutura analisada apresentou uma baixa previsão de vida útil considerando apenas o tempo de iniciação da corrosão. Esses resultados destacam a importância de um projeto de durabilidade consistente com o ambiente da estrutura.

O modelo em domínio bidimensional também foi utilizado para a análise de duas faces de um dos pilares de uma ponte localizada em clima tropical, cidade de Vitória, e os resultados obtidos pelo modelo são comparados com os resultados de campo. A previsão da vida útil é realizada e a região crítica para a iniciação da corrosão pode ser identificada. A estrutura analisada está em região não saturada e ambiente marinho. O comportamento do concreto, dadas as condições ambientais do local, foi analisado. A face norte apresentou maior concentração superficial, sendo a região mais favorável ao acúmulo dos respingos de sal. A face oeste apresentou maior coeficiente de difusão, fato que corrobora com o material mais poroso constatado visualmente.

Apesar do maior coeficiente de difusão, a face oeste apresenta menores valores de concentração de cloretos, devido à baixa concentração superficial. Por outro lado, a alta concentração superficial de cloreto obtida na face norte contribui para as maiores concentrações de cloreto

nos poros do concreto. A face norte é a região mais crítica. Os resultados obtidos destacam a importância do uso do modelo para identificação das regiões da estrutura propensas à deterioração por ação de íons cloreto.

A previsão de vida útil é realizada com base nos resultados de concentração superficial e coeficiente de difusão de cloretos obtidos da análise de dados experimentais de penetração de cloretos. Para o caso avaliado, após 50 anos, as concentrações de cloretos na armadura ultrapassaram a concentração crítica adotada. Destaca-se, entretanto, a adoção de valor conservador para esta concentração crítica, procedimento geralmente adotado na literatura. Desta forma, não é possível garantir a ocorrência da despassivação da armadura, devendo este resultado ser utilizado de modo a auxiliar o planejamento de manutenções, impedindo o progresso da deterioração e gerando soluções de baixo custo econômico e baixo impacto ambiental. Por fim, destaca-se a importância da continuidade desta pesquisa, com a avaliação dos outros pilares e vigas da ponte e com o acompanhamento da penetração de cloretos em estruturas reais ao longo dos anos, para confirmar os resultados obtidos pelo modelo e comprovar sua utilidade prática.

Esses resultados demonstraram o emprego do modelo como uma ferramenta na engenharia para o projeto de estruturas de concreto em ambientes marinhos e para avaliar o projeto de durabilidade de novas estruturas ou para a manutenção de estruturas. A verificação do modelo com outros casos reais ainda é necessária para analisar a eficiência e confiabilidade do modelo de previsão de vida útil. Fica evidente diante desse estudo que uma ferramenta para previsão da vida útil de estruturas de concreto é essencial para construção de estruturas duráveis e a necessidade da avaliação da durabilidade da estrutura. A partir deles, um planejamento de manutenção com base no comportamento do concreto pode ser definido.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O principal ponto de melhoria do modelo é a inclusão de diferentes formas de combinação de cloretos (relação entre cloretos combinados e cloretos livres) anteriormente destacados nessa dissertação. Além disso, desdobramentos futuros dessa pesquisa podem incluir formulações distintas para a concentração superficial do concreto, incluindo sua variação no tempo.

Para um modelo mais completo, é interessante incluir um modelo probabilístico, considerado mais realista, devido as diversas fontes de incertezas para os parâmetros e variáveis apresentados em um modelo puramente determinístico.

Além disso, uma recomendação interessante é considerar o efeito combinado de outros agentes agressivos, como o anidrido carbônico, responsável pela carbonatação. Como brevemente descrito nessa dissertação, o fenômeno da carbonatação pode influenciar a concentração de cloretos no concreto juntamente com o transporte de cloretos, causando o aumento dessa concentração no concreto.

Para a área experimental, recomenda-se pesquisas visando a obtenção dos parâmetros que representam o tipo de concreto nos modelos numéricos e suas características, como o coeficiente de difusão de cloretos e umidade, o fator de redução do coeficiente no tempo e os parâmetros que representam a combinação de cloretos, o que inclui o estudo das isotermas de combinação de cada concreto.

6 REFERÊNCIAS

- ALONSO, C. et al. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 7, p. 1047–1055, 2000.
- ANDRADE, C. et al. Comparison of Chloride Models : the Importance of Surface Concentration. In: 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE THROUGH SCIENCE AND ENGINEERING 2006, Quebec City. **Anais...** Quebec City
- ANDRADE, C. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 39, p. 9–18, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012>>
- ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; D'ANDREA, R. Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. **Journal of Nuclear Materials**, [s. l.], v. 412, n. 1, p. 209–216, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.12.236>>
- ANDRADE, C.; MARTÍNEZ, I. Use of indices to assess the performance of existing and repaired concrete structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 9, p. 3012–3019, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.009>>
- ANDRADE, Carmen; DIEZ, Jose Miguel; ALONSO, Cruz. Mathematical modeling of a concrete surface `skin effect` on diffusion in chloride contaminated media. **Advanced Cement Based Materials**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 39–44, 1997.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armadura: iniciação por cloretos**. 2001. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2001.
- ANN, K. Y.; AHN, J. H.; RYOU, J. S. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 239–245, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.014>>
- BAROGHEL-BOUNY, V. et al. Prediction of chloride binding isotherms of cementitious materials by “analytical” model or “numerical” inverse analysis. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 1207–1224, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.008>>
- BAROGHEL-BOUNY, V.; NGUYEN, T. Q.; DANGLA, P. Assessment and prediction of RC structure service life by means of durability indicators and physical/chemical models. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 522–534, 2009. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.009>>

BASTIDAS-ARTEAGA, E. et al. A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 720–730, 2011.

BODDY, Andrea et al. Overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 827–837, 1999.

CAO, Chong. 3D simulation of localized steel corrosion in chloride contaminated reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 72, p. 434–443, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.030>>

CASTELLOTE, C.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chloride-Binding Isotherms in Concrete Submitted to Non-Steady State Migration Experiments. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 1799–1806, 1999.

CAVALARO, S. et al. Service-Life Assessment of Existing Precast Concrete Structure Exposed to Severe Marine Conditions. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, [s. l.], v. 30, n. 3, 2015.

COLLEPARDI, MARIO; MARCIALIS, ALDO; TURRIZIANI, RENATO. **Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes** *Journal of the American Ceramic Society*, 1972.

CONCIATORI, David; SADOUKI, Hamid; BRÜHWILER, Eugen. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 38, n. 12, p. 1401–1408, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.006>>

COSTA, A; APPLETON, Andj. Chloride penetration into concrete in marine environment -Part I: Main parameters affecting chloride penetration. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 32, n. May, p. 252–259, 1999.

COSTA, António; APPLETON, Júlio. Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 169–179, 2002.

DA COSTA, A. et al. Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 43, p. 217–224, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.009>>

DOMINICINI, Wagner Klippel. **Modelagem computacional para a predição do período de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2016. Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2016.

DOMINICINI, Wagner Klippel; SUZANO, Ana Beatriz; CALMON, João Luiz. ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO : INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MODELOS DE CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL Service Life Model of Chloride Penetration in Reinforced Concrete Structures : Influence of Different Models of Surface Chloride Concentration Resumo carbonatação. In: ANAIS 58

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte

FERREIRA, Rui Miguel. **Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures under Chloride Attack Environments**. 2004. Univercity of Minho, [s. l.], 2004.

FIGUEIREDO, Enio et al. **Corrosión de armadura de estructuras de hormigón**. Mérida.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson. **Corrosión de armadura de estructuras de hormigón**. [s.l: s.n.].

GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 1001–1013, 1997.

GUIMARÃES, A. T. C. et al. Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 785–790, 2011.

GJORV, O. Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. Oficina de texto, 2015.

ISHIDA, Tetsuya; IQBAL, Prince O. Neill; ANH, Ho Thi Lan. Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 10, p. 913–923, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.014>>

LEE, Myung Kue; JUNG, Sang Hwa; OH, Byung Hwan. Effects of carbonation on chloride penetration in concrete. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 110, n. 5, p. 559–566, 2013.

LI, Kefei; LI, Chunqiu; CHEN, Zhaoyuan. Influential depth of moisture transport in concrete subject to drying-wetting cycles. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 31, n. 10, p. 693–698, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.006>>

LIN, Gang; LIU, Yinghua; XIANG, Zhihai. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 571–579, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.012>>

LOGAN, Daryl. **A first course in the finite element method**. 4. ed. [s.l.] : Thomson Canada Limited, 2007.

Disponível em: <<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=wjr3ArvAc4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=A+First+Course+in+the+Finite+Element+Method&ots=nan0HIK3bt&sig=gBLYugWkMJyh3mNkuOVTrfsWfww>>

LUPING, Tang; GULIKERS, Joost. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 589–595, 2007.

LUPING, Tang; NILSSON, Lars Olof. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 247–253, 1993.

MARCHAND, J.; SAMSON, E. Predicting the service-life of concrete structures - Limitations of simplified models. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 515–521, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.007>>

MARSAVINA, L. et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 264–274, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.015>>

MARTÍN-PÉREZ, B. et al. A study of the effect of chloride binding on service life predictions. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 1215–1223, 2000.

MARTÍN-PÉREZ, Beatriz. **Serfice Life modelling of R.C. highway structures exposed to chlorides**. 1999. Univeristy of Toronto, [s. l.], 1999.

MEIJERS, S. J. H. et al. Computational modelling of chloride ion transport in reinforced concrete. **HERON**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 207–216, 2001.

MEIJERS, S. J. H. et al. Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles and carbonation. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 38, n. 276, p. 145–154, 2005. Disponível em: <<https://www.rilem.net/boutique/fiche.php?cat=journal&reference=1633>>

MEIRA, G. R. et al. Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area-Influence of wind regime. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 41, n. 38, p. 8431–8441, 2007.

MEIRA, G. R. et al. Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 50, n. 9, p. 2724–2731, 2008.

MEIRA, G. R. et al. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones - The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 427–435, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.002>>

MEIRA, G. R. et al. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 55, p. 289–298, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.052>>

MELCHERS, R. E.; LI, C. Q. Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 11, p. 1068–1076, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.003>>

MELCHERS, R. E.; LI, C. Q.; LAWANWISUT, W. Probabilistic modeling of structural deterioration of reinforced concrete beams under saline environment corrosion. **Structural Safety**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 447–460, 2008.

- MONTEMOR, M. Fatima et al. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 45–53, 2002.
- NEVILLE, Adam. Chloride Attack of Reinforcement Concrete an Overview.Pdf. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 28, p. 63–70, 1995.
- NGALA, V. T.; PAGE, C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 27, n. 7, p. 995–1007, 1997.
- OŽBOLT, J. et al. Modelling the effect of damage on transport processes in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 9, p. 1638–1648, 2010.
- PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 395–406, 1981.
- PANG, Long; LI, Quanwang. Service life prediction of RC structures in marine environment using long term chloride ingress data: Comparison between exposure trials and real structure surveys. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 113, p. 979–987, 2016.
- POLDER, Rob B.; DE ROOIJ, Mario R. Durability of marine concrete structures - Field investigations and modelling. **Heron**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 133–154, 2005.
- PRADELLE, Sylvain; THIÉRY, Mickaël; BAROGHEL-BOUNY, Véronique. Comparison of existing chloride ingress models within concretes exposed to seawater. **Materials and Structures**, [s. l.], p. 4497–4516, 2016.
- PRADELLE, Sylvain; THIÉRY, Mickaël; BAROGHEL-BOUNY, Véronique. Sensitivity analysis of chloride ingress models: Case of concretes immersed in seawater. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 136, p. 44–56, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.019>>
- PUATATSANANON, W.; SAOUMA, V. E. Nonlinear Coupling of Carbonation and Chloride Diffusion in Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 264–275, 2005.
- RASMUSSEN, Thomas Heine; HANSEN, Niels; LAZAROVA-MOLNAR, Sanja. A Discrete-Event Simulation Tool for Decision Support in Selecting Project Scheduling Strategies. [s. l.], p. 1–5, 2017.
- SAEKI, T. Effect of Carbonation on Chloride. In: THIRD RILEM ON TESTING AND MODELLING THE CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE 2002, Madrid. **Anais...** Madrid
- SAETTA, Anna; SCOTTA, Roberto V.; VITALIANI, Renato V. 1993 - Saetta - Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete.PDF. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 90, n. 5, p. 441–451, 1993.
- SAETTA, Anna V; SCHREFLER, Bernhard A.; VITALIANI, Renato V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture,heat and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and**

Concrete Composites, [s. l.], v. 23, p. 761–772, 1993.

SAETTA, Anna V; SCHREFLER, Bernhard A.; VITALIANI, Renato V. 2 - D MODEL FOR CARBONATION AND MOISTURE/HEAT FLOW IN POROUS MATERIALS. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 1703–1712, 1995.

SANDBERG, Paul. Studies of chloride binding in concrete exposed in a marine environment. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 473–477, 1999.

SHI, Xianming et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 30, p. 125–138, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>>

SONG, Ha Won; KWON, Seung Jun. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 909–915, 2007.

SONG, Ha Won; LEE, Chang Hong; ANN, Ki Yong. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 113–121, 2008.

SUZANO, Ana. **Contribuição a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão por transporte de cloretos. Uma abordagem ao fluxo convectivo de íons cloreto**. 2017. Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2017.

TANG, L.; NILSSON, L. O. A new approach to the determination of pore distribution by penetrating chlorides into concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 695–701, 1995.

TANG, Luping; UTGENANNT, Peter; BOUBITSAS, Dimitrios. Luping Tang, Peter Utgenannt, Dimitrios Boubitsas - 2015 - Journal of the Chinese Ceramic Society - Durability and service life predicti. [s. l.], 2015.

TANG, S. W. et al. Recent durability studies on concrete structure. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 78, p. 143–154, 2015.

TAVARES, F. **Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete**. 2013. Universidade Politécnica de Madrid, [s. l.], 2013.

THOMAS, M. D. A. et al. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 1–7, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.001>>

THOMAS, Michael D. A.; BAMFORTH, Phil B. Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 487–495, 1999.

TUUTTI, Kyosti. **Corrosion of Steel in Concrete**. Stockholm.

VAN DER ZANDEN, A. J. J.; TAHER, A.; ARENDS, T. Modelling of water and chloride transport in concrete during yearly wetting/drying cycles. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 81, p. 120–129, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.012>>

VESIKARI, E. Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach. [s. l.], p. 38, 2009.

VILLAIN, Géraldine; THIERY, Mickaël. Impact of carbonation on microstructure and transport properties of concrete. **Durability of Building Materials**, [s. l.], n. April, 2005.

WU, Jin et al. Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 733–738, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816302264>>

YE, Hailong et al. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 457–463, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.194>>

ZHANG, Jieying; LOUNIS, Zoubir. Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1312–1323, 2006.

ZHU, Xingji et al. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 110, p. 369–380, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.034>>